Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Бабенко Демьян Алексеевич, Тепленко Сарра Исааковна, Чибишев Леонид Дмитриевич

"В помощь электрику обмотчику асинхронных электродвигателей" 1965 г.

Rev. 03.   23 Feb 2021

Глава восьмая. Сокращенный расчет обмотки статора асинхронного трехфазного электродвигателя. Расчет обмотки ротора.

19. Предварительные сведения.

Расчет обмоток электродвигателей сводится к определению необходимого количества эффективных проводов в пазе и сечения обмоточного провода. При расчете обмоток следует стремиться к тому, чтобы, не выходя из допустимых для данного типа электродвигателей магнитных и электрических нагрузок, полностью использовать заложенные в электродвигателе активные материалы – электротехническую сталь и обмоточную медь или алюминий. Электродвигатели старых серий в большинстве случаев имеют заниженные магнитные и электрические нагрузки, что при пересчете иногда дает возможность несколько увеличить мощность. Кроме того, применение обмоточных проводов с более тонкой и теплостойкой изоляцией и изоляционных материалов с более высокой нагревостойкостью также дает возможность увеличить мощность электродвигателя, а в отдельных случаях – и произвести замену медных обмоточных проводов алюминиевыми с возможным сохранением прежней мощности. Вопрос замены медных обмоточных проводов алюминиевыми при сохранении номинальной мощности имеет большое народнохозяйственное значение, поэтому этот вариант не должен упускаться. При пересчете следует учитывать, что увлечение большими магнитными и электрическими нагрузками в активных частях электродвигателя недопустимо, так как это ведет к чрезмерному нагреву электродвигателя и резкому сокращению срока службы его.

О величине магнитной и электрической нагрузки электродвигателя судят по величине магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки. Магнитная индукция в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке различных типов электродвигателей различны по величине и колеблются в больших пределах. Есть, например, электродвигатели с максимальными магнитными индукциями в воздушном зазоре, равными 3500 *гс*, и электродвигатели с индукциями, равными 8000 – 9000 *гс*. Также встречаются электродвигатели с плотностью тока в обмотке статора, равной 2,1 *а* на 1 $мм^2$ и 8,7 $А/мм^2$. Поэтому правильный выбор максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки представляет основную трудность при расчетах и пересчетах обмоток.

Магнитный поток, а значит, и величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре зависят от числа эффективных витков в фазе, что видно из формулы:

$$E_{Ф1} = 4{,}44 \times k_{W1} \times w_1 \times f \times Ф \times 10^{-8} \quad \text{в} \quad (12)$$

где: $E_{Ф1}$ – э. д. с. фазы обмотки статора, в; k_{W1}– обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага обмотки статора и число катушек в катушечной группе; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; f – частота переменного тока, *гц*. Ф – магнитный поток, *мкс*.

Так как падение напряжения в статоре электродвигателя незначительно, э. д. с. $E_{Ф1}$ можно приравнять к напряжению $U_{Ф1}$ и для удобства анализа формулу (12) представить в следующем виде:

$$Ф = \frac{U_{Ф1} \times 10^8}{4{,}44 \times k_{W1} \times w_1} \quad \text{мкс} \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что при неизменных напряжении и частоте сети магнитный поток обратно пропорционален числу эффективных витков в фазе обмотки.

Если число эффективных витков в фазе уменьшить, например, в 1,1 раза, то магнитный поток увеличится в 1,1 раза. Последствия от увеличения магнитного потока в 1,1 раза можно найти, анализируя приведенную ниже формулу, выражающую основной закон магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{\text{м. д. с.}}{R_m} = \frac{m_1 \times k_{w1} \times w_1 \times I\mu}{R_m} \quad (14)$$

где: м. д. с. – магнитодвижущая сила; R_m – магнитное сопротивление цепи магнитопровода; m_1– число фаз переменного тока обмотки статора; k_{W1} – обмоточный коэффициент; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; $I\mu$ – намагничивающий ток, *а*.

Если мы будем считать сопротивление магнитной цепи R_m постоянной величиной для данного электродвигателя, то переменными величинами в правой части формулы (14) являются эффективные витки фазы и намагничивающий ток $I\mu$, т. е. переменной величиной является произведение $I\mu \times w_1$ иначе говоря, намагничивающая сила холостого хода. Увеличение магнитного потока в 1,1 раза вызывает и увеличение намагничивающей силы холостого хода в 1,1 раза. Так как причиной увеличения магнитного потока в 1,1 раза явилось уменьшение числа эффективных витков в фазе обмотки статора w_1 в 1,1 раза, то, следовательно, для того чтобы намагничивающая сила холостого хода увеличились в 1,1 раза, намагничивающий ток должен возрасти в 1,1 × 1,1 = 1,21 раза, то есть в $1{,}1^2$.

Таким образом, уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает увеличение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока – в квадрате и, наоборот, увеличение числа эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает уменьшение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока – в квадрате.

Если при расчетах обмоток электрических машин незначительно отклоняться от расчетного числа эффективных витков в фазе, обусловленного нормальными магнитными нагрузками, то квадратичная зависимость между магнитным потоком (магнитной индукцией) и намагничивающим током будет соответствовать действительности, а при значительных отклонениях зависимость уже будет иной. Как известно, электротехническая сталь, применяемая для сердечников статоров и роторов электродвигателей, способна намагничиваться и изменять магнитную проницаемость; при этом насыщенная сталь резко уменьшает магнитную проницаемость. Уменьшение магнитной проницаемости активной стали вызывает увеличение магнитного сопротивления цепи магнитопровода в целом, что вызывает в свою очередь и рост намагничивающей силы холостого хода, т. е. и намагничивающего тока. Следовательно, значительное уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора против расчетных вызывает увеличение намагничивающего тока из–за роста магнитного потока (магнитной индукции) и магнитного сопротивления цепи магнитопровода (см. формулу 14).

Ниже приведены данные изменения тока холостого хода в зависимости от изменения числа эффективных проводов в фазе обмотки статора электродвигателя типа А62–6 мощностью 10 *квт*, напряжением 220/380 *в*, 37/21,5 *а*, 1000 *об. мин.* производства Ярославского электромеханического завода. Напряжение во время опыта поддерживалось постоянным (380 *в*), а изменению подвергались числа эффективных проводов в фазе обмотки статора, что вызывало соответствующие изменения величины магнитного потока (магнитной индукции) и тока холостого хода. Так как ток холостого хода трехфазного электродвигателя по величине мало отличается от намагничивающего тока:

$$I\text{xx} = (1{,}01 - 1{,}05) \times I\mu,$$

выводы из проведенного опыта можно отнести и к намагничивающему току.

Данные опыта подтвердили, что при увеличении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре в 1,5 раза ток холостого хода увеличился не в 2,25 раза, как было бы при квадратичной зависимости, а в 6,25 раза; при увеличении магнитной индукции в 1,73 раза ток холостого хода увеличился в 12,5 раза; при увеличении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода увеличился в 28,8 раза, превысив номинальный ток в 10,7 раза. При уменьшении магнитной индукции в 1,5 раза ток холостого хода уменьшился в 2,7 раза; при уменьшении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода уменьшился в 6,66 раза; при уменьшении магнитной индукции в 3 раза ток холостого хода уменьшился в 13,34 раза. Более интенсивно изменяется ток холостого хода при увеличении магнитной индукции против расчетной, так как здесь сказывается влияние магнитного насыщения стали.

Влияние изменения числа эффективных проводов на параметры электродвигателя.

При уменьшении числа эффективных проводов в пазе против расчетного уменьшается и коэффициент мощности (cos φ), так как при этом увеличивается реактивная составляющая потребляемого из сети тока на намагничивание магнитопровода; также уменьшается и к. п. д. электродвигателя из–за возрастания потерь в активной стали. Наряду с этим увеличиваются пусковой и максимальный моменты вращения, что является положительным моментом. При значительном снижении числа эффективных проводов против расчетного ток холостого хода и нагрев активных частей электродвигателя резко возрастают.
При увеличении числа эффективных проводов в пазе статора против расчетного cos φ увеличивается, но к. п. д., пусковой и максимальный моменты вращения уменьшаются. При значительном увеличении числа эффективных проводов в пазе (за счет уменьшения сечения провода) потери на нагрев обмотки значительно возрастают и резко снижается мощность электродвигателя.

Вторым, не менее важным вопросом при расчетах обмоток электродвигателей является выбор сечения обмоточных проводов обмотки. Сечение обмоточных проводов выбирают, исходя из допустимой плотности тока, качества изоляционных материалов, изоляции обмоточного провода и условий, в которых работает двигатель. Заниженная плотность тока ведет к недоиспользованию обмоточных материалов и занижению мощности электродвигателя, а чрезмерная плотность тока влечет за собой чрезмерный нагрев и сокращение срока службы электродвигателя. Между тем применение проводов с более нагревостойкой изоляцией позволяет увеличить плотность тока в проводах, повысить мощность электродвигателя или продолжительность его безаварийной работы. Улучшение условий охлаждения дает возможность повысить плотность тока в обмотке, а иногда и увеличить мощность электродвигателя.
При выборе плотности тока следует руководствоваться данными заводов–изготовителей для подобных типов электродвигателей, если при этом характер изоляции и марка проводов не меняются. При правильном выборе числа эффективных проводов в пазе статора и их сечения степень заполнения паза статора будет нормальной.
В технической литературе по ремонту электродвигателей и расчету обмоток нет единого метода для определения величины коэффициента заполнения паза. Одни авторы коэффициентом заполнения паза считают отношение площади всех изолированных проводов в пазе ко всей площади паза, другие – отношение площади всех изолированных проводов в пазе к площади паза за вычетом клина и пазовой изоляции. Второй метод определения коэффициента заполнения паза точнее, особенно для узких пазов. Первый метод менее точен, но проще и практичнее.

Иногда пользуются условным значением коэффициента заполнения паза, вычисляемым по формуле:

$$k_{\Pi} = \frac{N \times d_{\text{ИЗ}}^2}{S_{\text{ПИЗ}}}$$

где: N – число проводов в пазе; $d_{\text{ИЗ}}$ – диаметр провода с изоляцией; $S_{\text{ПИЗ}}$ – площадь паза за вычетом пазовой изоляции и клина. Подсчитанный по этой формуле коэффициент заполнения паза не должен превышать 0,75. При исчислении коэффициента заполнения паза по первому методу можно пользоваться следующими числовыми значениями:

а) для трапециевидных пазов:
при однослойной обмотке: $k_{\Pi} = 0{,}37 \div 0{,}45$
при двухслойной обмотке: $k_{\Pi} = 0{,}35 \div 0{,}42$
б) для овальных пазов
при однослойной обмотке: $k_{\Pi} = 0{,}42 \div 0{,}55$
при двухслойной обмотке: $k_{\Pi} = 0{,}37 \div 0{,}45$

Меньшее значение коэффициента заполнения паза принимают для двигателей меньшей мощности.

Замена одного провода двумя или несколькими эквивалентного сечения.

При выполнении обмотки статора часто наряду с параллельными ветвями приходится применять и параллельные провода. Замена одного провода двумя или несколькими параллельными проводами одинакового сечения производится довольно часто. Замена же одного провода двумя или несколькими параллельными проводами разных сечений встречается реже; о допустимости такой замены имеются разные мнения. Однако многочисленные опыты подтверждают, что при том числе витков, которое имеется в обмотках электродвигателей, токи в параллельных проводах практически распределяются пропорционально сечениям проводов и обратно пропорционально их активным сопротивлениям, что позволяет производить замену одного провода двумя или несколькими проводами разного сечения. Однако больше трех параллельных проводов применять не рекомендуется, так как при этом снижается коэффициент заполнения паза за счет дополнительной изоляции проводов н воздушных прослоек между проводами. В приложении приведены варианты замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по их суммарному сечению.

20. Расчет обмотки статора.

Много методов и способов приближенных и сокращенных расчетов обмоток электродвигателей существует и применяется при пересчете электрических двигателей, однако не все они достаточно точны при определении расчетных параметров. Одним из наиболее простых и достаточно точных методов расчета статорных обмоток электродвигателей мощностью до 100 *квт* является изложенный ниже. Для определения числа эффективных проводов в пазе статора в основу расчета берется приближенная формула:

$$N_{\Pi} = \frac{2{,}6 \times U_{\Phi} \times p \times 10^6}{D_B \times L \times z \times B_B} \quad (15)$$

где: U_{Φ} – фазное напряжение, *в*; p – число пар полюсов; D_B – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см*., L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*.; z – число пазов статора; B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*; 2,6 – коэффициент, учитывающий частоту f = 50 *гц* и другие постоянные или принятые постоянными величины.

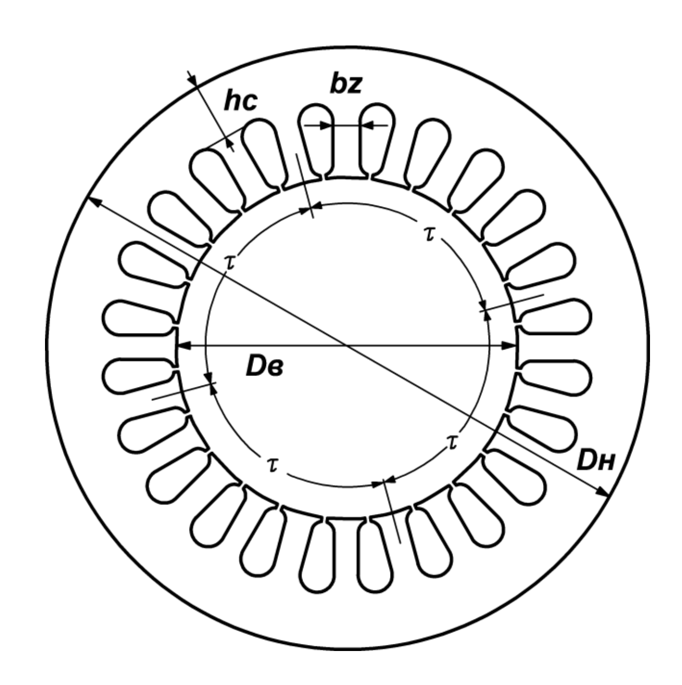


Рис. 32. Пластина пакета статора с основными размерами и полюсными делениями, D_B – диаметр внутренний, D_H – диаметр наружный, h_C – спинка статора, b_Z – ширина зубца, τ – полюсное деление

Расчет по этой формуле производится с учетом того, что обмоточный коэффициент принят равным 0,93, падение напряжения в обмотке – равным 4% величины напряжения, и синусоидальности формы поля. При выполнении расчета электродвигателя, имеющего паспорт, но не имеющего обмотки, задаются величиной максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом типа электродвигателя.

Таблица 3.

Мощность электродвигателя P, *квт*	Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_B	
	гс	*вб/м³*
до 1,0	3500 – 6000	0,35 – 0,6
1,1 – 5,0	4500 – 7200	0,45 – 0,72
свыше 5	5000 – 8000	0,5 – 0,8

Ориентировочно при выборе максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре можно пользоваться табл. 3. При подсчете по формуле (15) числа эффективных проводов в пазе статора целесообразно пользоваться постоянными коэффициентами (табл. 4) для фазного напряжения 220 *в* при различном числе полюсов и числе пазов статора. Числовые значения постоянных коэффициентов приведены в табл. 4. Коэффициенты таблицы включают в себя величину:

$$C = \frac{2{,}6 \times U_{\Phi} \times p}{z}$$

Для определения числа эффективных проводов в пазе статора формула примет следующий вид:

$$N_{\Pi} = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times B_B} \quad (16)$$

Таблица 4. Постоянные коэффициенты для подсчета числа эффективных проводов в пазе статора электродвигателя при фазном напряжении *220 в*.

z	$2p$			
	2	4	6	8
18	31,8	63,6	95,2	–
24	23,8	47,6	–	95,2
27	21,2	42,4	63,6	84,8
30	19,1	38,2	–	76,4
36	15,9	31,8	47,6	63,6
48	11,9	23,8	–	47,6
54	–	21,2	31,8	42,4
72	–	15,9	23,8	31,8

Например, для электродвигателя с числом полюсов $2p = 4$ и числом пазов $z = 36$ количество эффективных проводов в пазе по формуле (16) равно:

$$N_{\text{п}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{D_B \times L \times B_B}$$

где: число 31,8 взято из табл. 4. Если быть уверенным, что величина максимальной индукции в воздушном зазоре выбрана правильно, то на этом можно было бы окончить определение числа эффективных проводов в пазе. Однако даже опытный расчетчик не в состоянии точно определить, какая величина индукции соответствует данному электродвигателю, так как она различна не только для различных типов электродвигателей, но даже при одном типе и колеблется в больших пределах. Так в электродвигателях типа Р максимальная индукция в воздушном зазоре находится в пределах 5600 – 7200 *гс*, в электродвигателях типа АД – в пределах 5000 – 8300 *гс*, в электродвигателях типа МА 5000 – 9300 *гс*, в электродвигателях типа ТТ 3800 – 7200 *гс*, в электродвигателях типов МКА, МКВ – 4500 – 7900 *гс*. Не в меньших пределах величина максимальной индукции в воздушном зазоре колеблется и в электродвигателях иностранных фирм. Поэтому при расчете обмоток следует проверять правильность выбранной величины максимальной индукции в воздушном зазоре с вычислением магнитных нагрузок в зубце и спинке активной стали статора.

Индукцию в зубце статора можно проверять по следующей формуле:

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{z \times b_Z} \quad (17)$$

где: $B_{\text{В}}$ – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*. D_B – внутренний диаметр статора, *см*. z – число пазов статора; b_{Z} – расчетная ширина зубца, *см*. 3,5 – коэффициент, включающий в себя постоянные величины и коэффициент заполнения стали, принятый равным 0,9. Расчетную ширину зубца берут между самым широким и самым узким размерами зубца, отступая на ⅓ длины от узкой в сторону широкой.

Индукцию в спинке статора можно проверять по формуле:

$$Ba = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times h_{\text{C}}} \quad (18)$$

где: B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*; D_B – внутренний диаметр статора, *см*.; p – число пар полюсов; h_{C} – высота спинки статора, *см*.; 0,6 – коэффициент, включающий в себя коэффициент магнитного перекрытия, принятый равным 0,7, коэффициент заполнения активной стали, принятый равным 0,9, и постоянные величины.

Вычисленные магнитные индукции в зубце статора должны находиться в пределах 13000–17000 *гс*, а в спинке статора – в пределах:

при $2p = 2$: 12000 – 17 000 *гс*;
$2p > 2$: 10000 – 15000 *гс*.

Если индукция в зубце и спинке статора значительно отклоняется от указанных выше предельных величин, надлежит увеличить или уменьшить величину максимальной индукции в воздушном зазоре и в зависимости от полученных результатов окончательно подсчитать число эффективных проводов в пазе. При пересчете целесообразно применить способ пропорционального пересчета.

Если напряжение электродвигателя отличается от $U_Ф$ = 220 *в*, принятого по табл. 4, то коэффициент по табл. 4 следует увеличить или уменьшить пропорционально изменению напряжения. Например, при $U_Ф$ = 380 *в* постоянный коэффициент умножается на 1,73, при $U_Ф$ = 127 *в* делится на 1,73, а при $U_Ф$ = 290 *в* умножается на 220/290 = 1,32 и т. д.

При расчетах обмотки электродвигателя, не имеющего паспортных данных и старой обмотки, расчет приходится вести, задавшись наиболее вероятной скоростью вращения электродвигателя, исходя из конфигурации сердечника статора. Сравнительно большая высота спинки статора свидетельствует о быстроходности электродвигателя, а малая – о тихоходности. Выполнив расчет, можно по величине магнитной индукции в спинке статора определить, правильно ли задались скоростью вращения электродвигателя. Если магнитная индукция в спинке статора резко не выходит за пределы допустимых величин, то принятая при расчете скорость вращения соответствует паспортной. При малых индукциях в спинке статора расчет следует повторить, приняв более высокую скорость вращения, а при больших индукциях – наоборот. При определении приемлемости принятой индукции имеется в виду, что в воздушном зазоре и зубце статора она также не выходит из предела допустимых величин.

Для определения числа полюсов электродвигателя можно пользоваться формулой, позволяющей определить наименьшее число полюсов, допустимое в данном электродвигателе:

$$2p = 0{,}5 \times \frac{D_B}{h_С} \qquad (19)$$

где: D_B – внутренний диаметр статора, *см.*; $h_С$ – высота спинки статора, *см*. Полученный результат следует округлить до ближайшего четного числа. Число полюсов электродвигателя можно точнее определить по формуле:

$$2p = \frac{B_B \times D_B \times L}{Ba \times L_С \times h_С} \qquad (20)$$

где: B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*. D_B – внутренний диаметр статора, *см*. L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*. Ba – индукция в спинке статора, *гс*. $L_С$ – чистая длина активной стали статора без изоляции между листами сердечника, *см*. $h_С$ – высота спинки статора, *см*.

При определении числа полюсов электродвигателя по формуле (20) следует задаться максимальной индукцией в воздушном зазоре B_B и индукцией в спинке статора Ba. Полученное число полюсов следует округлить до ближайшего четного числа и повторно определить величину индукции в спинке статора. Если индукция в спинке статора все же будет выходить за пределы допустимых величин, следует изменить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре до величины, при которой индукция в спинке статора будет находиться в пределах норм. По формуле (17) определяют индукцию в зубце статора, а по формуле (16) – число эффективных проводов в пазе.

При проведении сокращенного расчета предполагалось, что ремонтируемый электродвигатель не имеет обмотки. Если же необходимо только проверить правильность старой обмотки электродвигателя, подлежащей замене, то повторных пересчетов для определения максимальной индукции в воздушном зазоре не требуется, так как она будет определена по фактическому числу эффективных проводов в пазе. Перерасчет потребуется только в случае, если у поступившего в ремонт электродвигателя неправильная обмотка, что может быть определено по величине магнитных нагрузок в воздушном зазоре, зубце и спинке статора. Следующей стадией расчета будет определение сечения обмоточного провода новой обмотки. Сечение одного эффективного провода с изоляцией определится по формуле:

$$F_{\text{ИЗ}} = \frac{k_{\text{П}} \times S_{\text{П}}}{N_{\text{П}}} \quad \text{мм}^2 \quad (21)$$

где: $k_{\text{П}}$ – коэффициент заполнения паза; $S_{\text{П}}$ – площадь паза; $N_{\text{П}}$ – количество эффективных проводов в пазе.

Коэффициент заполнения паза принимается, исходя из данных, изложенных в предварительных сведениях к расчету. Площадь паза легко подсчитать, сделав оттиск его на миллиметровой бумаге и построив на нем равновеликий прямоугольник. Далее выбирают число параллельных ветвей и число параллельных проводов в зависимости от величины полученного при расчете сечения одного эффективного провода с изоляцией. Сечение одного элементарного провода с изоляцией подсчитаем по формуле:

$$S_{1\text{ИЗ}} = \frac{F_{\text{ИЗ}}}{a \times b} \quad (22)$$

где: a – число параллельных ветвей; b – число параллельных проводов. Число параллельных проводов и параллельных ветвей выбирается так, чтобы элементарный провод свободно входил в шлиц паза статора. Диаметр элементарного изолированного провода определяется или по таблице перевода сечений в диаметры, или по формуле:

$$d_{\text{ИЗ}} = 1{,}13 \times \sqrt{S_{1\text{ИЗ}}}$$

Диаметр голого провода определяется методом вычитания от изолированного провода толщины его изоляции:

$$d = d_{\text{ИЗ}} - \delta_{\text{ИЗ}}$$

где: $\delta_{\text{ИЗ}}$ – двусторонняя толщина изоляции. Величину $\delta_{\text{ИЗ}}$ можно брать из каталогов и справочников или по приложению 4.

По диаметру голого провода найдем его сечение. Если нет уверенности в правильном выборе коэффициента заполнения паза, можно один паз статора заполнить пазовой изоляцией и проводом полученного сечения и подсчитать фактическое количество проводов. Если расчетное количество элементарных проводов не вмещается в паз, необходимо сечение провода уменьшить и, наоборот, если паз не заполняется, следует сечение увеличить. В обоих случаях производится перерасчет сечения. Практически это выполняется так.

Заполняют данным проводом изолированный паз, оставив место для клина. Подсчитывают количество вложенных элементарных проводов. Вычисляют суммарную площадь, занятую медью, перемножением количества элементарных проводов на их сечение. Полученную площадь меди делят на расчетное количество элементарных проводов с изоляцией.

По полученному сечению элементарного провода находят его диаметр по таблице или расчету:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times S_1} = 1{,}13 \times \sqrt{S_1}$$

При переходе на иной вид изоляции провода вычисляют не суммарную площадь меди, а суммарную площадь изолированных проводов, разделив которую на расчетное количество элементарных проводов, определяют сечение элементарного провода с изоляцией, а за вычетом двусторонней толщины изоляции – и диаметр голого провода. Зная сечение обмоточного провода, можно вычислить плотность тока и сравнить ее с допустимой для электродвигателей данного типа:

$$\Delta = \frac{I_Ф}{a \times b \times S_1} \quad (23)$$

где: $I_Ф$ – фазный ток электродвигателя, (при соединении обмотки звездой $I_Ф = I_Л$; при соединении треугольником $I_Ф = Iл/\sqrt{3}$, a – число параллельных ветвей; b – число параллельных проводов; S_1 – сечение элементарного провода; $I_Л$ – линейный ток. Допустимую плотность тока можно определить по табл. 5. Для электродвигателей закрытого и взрывобезопасного исполнений плотности тока берутся ближе к нижнему пределу. Для обмоток фазных роторов плотность тока берется в 1,35–1,45 раза большей, чем для обмоток статора.

Таблица 5. Рекомендуемые плотности тока.

Мощность электродвигателя, *квт*	Синхронная скорость вращения *об. мин.*	Плотность тока в обмотке статора, *а/мм²*
0,1 – 1,0	3000	4,5–6,8
	1500	4,0–6,3
1,1 – 5,0	3000	5,5–7,5
	1500	4,8–7,2
	1000	4,5–6,7
5,1 – 10,0	3000	5,0–7,2
	1500	4,5–7,0
	1000	4,3–6,5
	750	4,1–6,2
10,1 – 25,0	3000	5,0–7,0
	1500	4,5–6,5
	1000	4,3–6,3
	750	4,1–6,0
25,1 – 100	3000	4,8–6,6
	1500	4,3–6,0
	1000	4,0–5,5
	750	3,8–5,3

Если мощность электродвигателя не известна, то задаются плотностью тока и определяют фазный ток электродвигателя, после чего вычисляют мощность электродвигателя:

$$P = \frac{3 \times U_Ф \times I_Ф \times \cos\varphi \times \eta}{1000} \quad квт \quad (24)$$

где: $U_Ф$ – фазное напряжение; $I_Ф$ – фазный ток. Косинус φ и к. п. д. берутся в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя. Таблицы значений косинуса φ и к. п. д. приведены в приложениях 5 и 6.

21. Расчет обмотки ротора.

При ремонте расчет обмотки фазного ротора производят если в нем отсутствует старая обмотка или при необходимости изменения скорости вращения. При пересчете обмотки статора на новое напряжение не требуется производить пересчета обмотки ротора; напряжение на его кольцах, а также фазный ток будут прежними. Порядок расчета фазного ротора при отсутствии обмотки в нем следующий: э. д. с. фазного ротора при режиме короткого замыкания равна:

$$E_{\Phi 2} = E_{\Phi 1} \times \frac{k_{W2} \times w_2}{k_{W1} \times w_1} \text{ в} \quad (25)$$

где: $E_{\Phi 2}$ – фазная э. д. с. ротора; $E_{\Phi 1}$ – фазная э. д. с. статора; k_{W2} – обмоточный коэффициент обмотки ротора; k_{W1} – обмоточный коэффициент обмотки статора; w_2 – число эффективных витков в фазе обмотки ротора; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора и ротора, которые незначительны по величине, и обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора приравнять, что также допустимо, то для определения фазного напряжения на разомкнутых кольцах ротора можно применить следующую формулу:

$$U_{\Phi 2} = U_{\Phi 1} \times \frac{w_2}{w_1} \text{ в} \quad (26)$$

откуда:

$$w_2 = \frac{w_1 \times U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}} \quad (27)$$

где: $U_{\Phi 2}$ – фазное напряжение на кольцах ротора; $U_{\Phi 1}$ – фазное напряжение статора.

Поскольку в формулах (26) и (27) неизвестными являются фазное напряжение на кольцах ротора и число эффективных витков в фазе обмотки ротора, величиной напряжения обмотки ротора следует задаться. При выборе линейного напряжения на кольцах ротора можно пользоваться табл. 6.

Таблица 6. Величина линейного напряжения на кольцах ротора в зависимости от мощности электродвигателя.

Вид обмотки	Линейное напряжение на кольцах ротора, *в*	
	P = 3 ÷ 20 *квт*	P = 20 ÷100 *квт*
Волновая стержневая	100 –290	150 –290
Катушечная	100 –290	220 –340

Фазное напряжение обмотки звездой будет равно:

$$U_{\Phi 2} = \frac{U_{Л2}}{\sqrt{3}} \text{ в}$$

Число эффективных витков в фазе обмотки статора определяют по формуле:

$$w_1 = \frac{N_{П1} \times z_1}{2 \times m_1} = \frac{N_{П1} \times z_1}{2 \times 3} = \frac{N_{П1} \times z_1}{6} \quad (28)$$

где: w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; $N_{П1}$ – число эффективных проводов в пазе статора; z_1 – число пазов статора; m_1 – число фаз обмотки статора.

Вычислив число эффективных витков в фазе обмотки ротора, определяют число эффективных проводов в пазе ротора по формуле:

$$N_{П2} = \frac{2 \times m_2 \times w_2}{z_2} = \frac{2 \times 3 \times w_2}{z_2} = \frac{6 \times w_2}{z_2} \quad (29)$$

где: $N_{П2}$ – число эффективных проводов в пазе ротора; m_2 – число фаз обмотки ротора; w_2 – число эффективных витков в фазе обмотки ротора; z_2 – число пазов ротора.
Определяют ток ротора:

$$I_{Ф2} = (0{,}9 \div 0{,}85) \times I_{Ф1} \times \frac{w_1}{w_2} \;\; a \quad (30)$$

где: $U_{Ф2}$ – фазный ток ротора; $U_{Ф1}$ – фазный ток статора.

Задаются плотностью тока в обмотке ротора, исходя из соображений, изложенных в предварительных сведениях к расчету, выбирают число параллельных ветвей и параллельных проводов и определяют сечение элементарного провода обмотки ротора:

$$S_2 = \frac{I_{Ф2}}{a_2 \times b_2 \times \Delta_2} \quad мм^2 \quad (31)$$

где: S_2 – сечение элементарного провода обмотки ротора, $мм^2$; a_2 – число параллельных ветвей обмотки ротора; b_2 – число параллельных проводов обмотки ротора; Δ_2 – плотность тока в обмотке ротора, $a/мм^2$. По сечению определяют диаметр провода, где $d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times s_2}$ или по справочной таблице. Диаметр изолированного провода равен:

$$d_{ИЗ2} = d_2 + \delta_{ИЗ}$$

где: $d_{ИЗ2}$ – диаметр изолированного провода обмотки ротора; d_2 –диаметр провода обмотки ротора; $\delta_{ИЗ}$ – двусторонняя толщина изоляции провода. По диаметру изолированного провода определяют и его сечение. Для определения коэффициента заполнения паза ротора снимают при помощи бумаги оттиск паза и на нем строят равновеликий прямоугольник и вычисляют площадь паза $S_{П2}$ и коэффициент его заполнения, пользуясь формулой:

$$k_{П2} = \frac{S_{ИЗ2} \times N}{S_{П2}} \quad (32)$$

где: N – количество элементарных проводов в пазе ротора.

Коэффициент заполнения паза должен находиться в пределах величин, указанных в предварительных сведениях к расчету. Для стержневой обмотки коэффициент заполнения паза обычно равен 0,46 – 0,55. При значительных отклонениях коэффициента заполнения паза от нормальной величины следует заполнить один паз ротора проводом сечения, полученного при расчете, и подсчитать число проводов. Если расчетное число элементарных проводов не вместилось в паз, следует диаметр провода уменьшить; если же не заполняется паз, диаметр провода следует увеличить.

22. Пересчет электродвигателя на другую скорость вращения.

Чтобы изменить скорость вращения электродвигателя, необходимо изменить число полюсов в статоре и фазном роторе. Это достигается изменением шага и числа катушек в катушечной группе в обмотках статора и фазного ротора при перемотке электродвигателя.

Перевод электродвигателя на другое число полюсов при неизменном напряжении, частоте и индукции в воздушном зазоре связан с изменением магнитного потока, который изменяется обратно пропорционально числу полюсов и прямо пропорционально скорости вращения. Если четырехполюсный электродвигатель переделать на двухполюсный, т. е. уменьшить число полюсов в 2 раза, то полюсное деление τ и сечение* в воздушном зазоре также увеличатся в 2 раза, в результате чего при прежнем значении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре магнитный поток увеличится в 2 раза. Так как напряжение и частота остаются без изменения, с увеличением магнитного потока, приходящегося на полюс, в 2 раза необходимо уменьшить и число эффективных проводов в пазе статора в 2 раза, что дает возможность сечение обмоточного провода увеличить в 2 раза и соответственно увеличить мощность.
Обозначим скорость вращения, мощность, число эффективных проводов в пазе и сечение эффективного провода принятыми ранее буквами с индексом "ст" для старых данных и индексом "нов" для новых данных и установим соотношение между ними.

*Сечением в воздушном зазоре называется поверхность расточки статора, равная произведению полюсного деления τ на расчетную длину статора Li и коэффициент магнитного перекрытия α. Расчетная длина равна полусумме длин сердечника статора с вентиляционными каналами и без них.

Число эффективных проводов в пазе при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старой скорости вращения и обратно пропорционально новой скорости вращения:

$$N_{\text{пнов}} = N_{\text{пст}} \times \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}} \quad (33)$$

При переходе на новую скорость вращения мощность изменяется примерно пропорционально новой скорости вращения и обратно пропорционально старой скорости вращения:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \times \frac{n_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}}} \quad (34)$$

Учитывая изменения коэффициента мощности и к. п. д. при новой скорости вращения электродвигателя, его новая мощность будет равна:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \times \frac{n_{\text{нов}} \times \cos\varphi_{\text{нов}} \times \eta_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}} \times \cos\varphi_{\text{ст}} \times \eta_{\text{ст}}} \quad (35)$$

Сечение эффективного провода при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старому числу эффективных проводов в пазе и обратно пропорционально новому числу эффективных проводов в пазе:

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \times \frac{N_{\text{пст}}}{N_{\text{пнов}}} \quad (36)$$

Необходимо подчеркнуть, что пользоваться приведенными выше формулами (33), (34), (35) и (36) можно лишь в том случае, если максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре оставлена при пересчете электродвигателя на другую скорость вращения неизменной, что не всегда удается. Электродвигатели в большинстве случаев конструируют так, чтобы полностью использовать активную сталь, не допуская резерва для значительного увеличения магнитных нагрузок.

При уменьшении скорости вращения электродвигателя затруднений для сохранения прежней величины максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не встречается; число полюсов увеличится, полюсное деление τ уменьшится, магнитный поток уменьшится. Уменьшение магнитного потока вызовет соответственное увеличение числа эффективных проводов в пазе, уменьшение эффективного сечения провода и снижение мощности электродвигателя. Магнитная индукция в зубце статора останется прежней, а магнитная индукция в спинке сердечника статора снизится.

При увеличении скорости вращения в 1,5 и особенно в 2 раза часто нельзя сохранить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре неизменной из – за сильно возрастающей магнитной индукции в спинке статора. В этих случаях максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре уменьшают до такой величины, при которой магнитная индукция в спинке статора не будет выходить за пределы допустимых величин. Уменьшение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре повлечет за собой увеличение числа эффективных проводов в пазе против величины, вычисленной по формуле (33), поэтому и сечение эффективного провода придется уменьшить; в связи с этим снизится и мощность электродвигателя по сравнению с величиной, вычисленной по формуле (35). Поэтому при пересчете электродвигателей на большую скорость вращения необходимо производить расчет магнитных нагрузок и не ограничиваться только формулами (33), (34), (35) и (36), которыми в основном можно пользоваться при уменьшении скорости вращения электродвигателя.
Ход расчета обмотки фазного ротора при переходе на другие скорости вращения показан в примере расчетов.
При пересчетах электродвигателей на другую скорость вращения необходимо учитывать и следующее. При снижении скорости вращения ухудшается охлаждение электродвигателя, в связи с чем полученную по формуле (35) мощность рекомендуется уменьшить на 10 – 15%. При увеличении скорости вращения плотность тока можно повысить на 10 – 15% и соответственно мощность электродвигателя. При переходе на новую скорость вращения может измениться номинальный вращающий момент электродвигателя, поэтому в таких случаях следует предварительно рассчитать достаточность момента для данной нагрузки. Для определения номинального вращающего момента электродвигателя применяется следующая формула:

$$M = 975 \times \frac{P}{n} \text{ кГ} \times \text{м} \quad (37)$$

где: P – номинальная мощность электродвигателя, *квт*; n – скорость вращения электродвигателя, *об. мин.* Чтобы не допустить снижения номинального вращающего момента при переходе на другую скорость вращения и повысить пересчитанную на новую скорость вращения мощность электродвигателя, целесообразно применить провод с более тонкой и более нагревостойкой изоляцией. При увеличении скорости вращения электродвигателя нагрев подшипников увеличивается, а при уменьшении скорости вращения он уменьшается. Следовательно, при увеличении скорости вращения электродвигателя потребуется усилить контроль за температурой подшипников. При переходе на большую скорость вращения необходимо проверить окружную скорость ротора по формуле:

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_2 \times n}{60 \times 1000} \quad \text{м/сек} \ (38)$$

где: $\upsilon_{\text{Р}}$ –окружная скорость ротора, *м/сек.*; D_2 – диаметр ротора, *мм*.
Окружная скорость фазного ротора не должна превышать 30 – 40 *м/сек.*, а короткозамкнутого 40 – 60 *м/сек*. При переходе на большую скорость вращения необходимо усилить бандаж фазного ротора.

При перемотке обмоток электродвигателя на большую скорость вращения увеличивается шаг обмотки, что способствует увеличению длины вылета лобовых частей. Поэтому следует проверить, особенно при переходе на 3000 *об. мин.*, допускает ли глубина подшипниковых щитов размещение удлиненных лобовых частей обмотки статора. В противном случае можно взять укорочение обмотки по пазам больше, чем 0,8 y, и не ниже 0,7 y.

23. Пересчет электродвигателя при замене материала обмоточного провода.

При ремонте электродвигателей иногда приходится производить замену материала обмоточных проводов, например вместо медных проводов применять алюминиевые и наоборот. Удельное электрическое сопротивление алюминиевых проводов больше медных в 1,63 раза ($\rho_{МЕД}$ = 0,0175; $\rho_{АЛ}$ = 0,0285 *ом* × $мм^2/м$). Поэтому замена медного провода алюминиевым того же сечения приведет или к снижению мощности электродвигателя в 1,63 раза, или при сохранении мощности к увеличению потерь в обмотке статора электродвигателя, более чем на 63%, что снизит к. п. д. электродвигателя, увеличит нагрев обмотки и сократит срок его службы. Чтобы избежать указанных выше нежелательных последствий, следует максимально увеличить сечение алюминиевого провода за счет:

1) применения более тонкой изоляции проводов и изоляции паза;
2) повышения коэффициента заполнения паза статора;
3) выполнения обмотки в один провод вместо двух параллельных проводов и повышения магнитных нагрузок, если расчетом будет установлено, что они занижены.

Проведенные некоторыми заводами и научно – исследовательскими институтами исследовательские работы подтвердили возможность замены медных обмоточных проводов алюминиевыми даже без снижения мощности для некоторых старых типов электродвигателей и единой серии (А и АО) мощностью до 100 *квт*. Для замены провода в каждом отдельном случае необходимо проводить пересчет электродвигателя по следующему методу.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым. Технические данные электродвигателя и данные замеров:

Тип электродвигателя А51–4
Мощность P = 4,5 *квт*.
Напряжение U = 220/380 *в*
Ток I = 16,3/9,4 *а*
Скорость вращения n = 1500 *об. мин.*
Внутренний диаметр статора $D_В$ = 152 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 90 *мм*.
Число пазов статора z = 36
Ширина зубца статора b_Z = 7 *мм*.
Высота спинки статора $h_С$ = 24,5 *мм*.
Число эффективных проводов в пазе $N_П$ = 32
Провод ПЭЛБО 1,62 *мм*., в один провод, обмотка однослойная без параллельных ветвей, сечение эффективного провода F = 2,06 $мм^2$
Ротор – короткозамкнутый.

Вычисляют плотность тока в обмотке статора при медном проводе:

$$\Delta_м = \frac{I}{F} = \frac{9,4}{2,06} = 4,56 \quad а/мм^2$$

Вычисляют равноценную по нагреву плотность тока для алюминиевых проводов:

$$\Delta_{эл} = \Delta_{м} \times \frac{\rho_{М}}{\rho_{АЛ}} = 4{,}56 \times \frac{0{,}0175}{0{,}0285} = 2{,}81 \ a/мм^2$$

Вычисляют магнитные нагрузки:

$$B_B = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times N_{П}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{15{,}2 \times 9{,}0 \times 32} = 7300 \text{ гс}$$

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{z \times b_Z} = 3{,}5 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{36 \times 0{,}7} = 15500 \text{ гс}$$

$$B_a = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times h_{С}} = 0{,}6 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{2 \times 2{,}45} = 13600 \text{ гс}$$

Таким образом, увеличивать сечение алюминиевого провода за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазе и соответствующего увеличения магнитных нагрузок нецелесообразно. Вычисляют коэффициент заполнения паза статора. Площадь паза, замеренная или по каталогу:

$$S_{П} = 206{,}5 \text{ мм}^2$$

Диаметр медного провода с изоляцией:

$$d_{ИЗ} = d + \delta_{ИЗ} = 1{,}62 + 0{,}21 = 1{,}83 \text{ мм.}$$

Сечение эффективного провода с изоляцией:

$$F_{ИЗ} = \frac{\pi \times d_{ИЗ}^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 1{,}83^2}{4} = 2{,}64 \text{ мм}^2$$

Сечение всех эффективных проводов с изоляцией:

$$F_{ИЗ} \times N_{П} = 2{,}64 \times 32 = 84{,}5 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения паза:

$$k_{П} = \frac{F_{ИЗ} \times N_{П}}{S_{П}} = \frac{84{,}5}{206{,}5} = 0{,}41$$

Таким образом, коэффициент заполнения паза можно увеличить за счет лучшего использования паза и меньшей жесткости алюминиевых проводов по сравнению с медными. Возьмем $k'_{П} = 0{,}45$.

Пересчитывают сечение эффективного провода с изоляцией, учитывая новый коэффициент заполнения паза:

$$F'_{ИЗ} = F_{ИЗ} \times \frac{k'_{П}}{k_{П}} = 2{,}64 \times \frac{0{,}45}{0{,}41} = 2{,}9 \ \text{ мм}^2$$

что соответствует диаметру $d'_{ИЗ} = 1{,}95$ *мм*. Выбирают алюминиевый провод марки ПЭВА – 2 диаметром $d' = 1{,}88$ *мм*. с изоляцией $\delta_{ИЗ} = 0{,}08$ *мм*. Сечение провода $F' = 2{,}78$ *мм²*.

При выборе диаметра изолированного провода необходимо учитывать ширину шлица паза.

Вычисляют ток, исходя из сечения алюминиевого провода и вычисленной ранее плотности тока для алюминиевого провода:

$$I' = \Delta_{\text{АЛ}} \times F' = 2{,}81 \times 2{,}78 = 7{,}8 \quad a$$

Вычисляют величину новой мощности электродвигателя:

$$P' = P \times \frac{I'}{I} = 4{,}5 \times \frac{7{,}8}{9{,}4} = 3{,}73 \quad \text{квт}$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшена мощность электродвигателя при переходе на алюминиевый обмоточный провод:

$$\frac{P'}{P} = \frac{4{,}5}{3{,}73} = 1{,}205, \text{т. е. на } 20{,}5\%$$

Учитывая, что в данном примере применена изоляция провода типа винифлекс, для которой допустимое превышение температуры составляет 85°С, следует считать возможным повысить плотность тока в обмотке статора данного электродвигателя на 20%, установив номинальную мощность его 4,5 *квт*. Пересчитанный электродвигатель в связи с заменой медного обмоточного провода алюминиевым может работать при мощности 4,5 *квт*; при этом незначительно возрастут его потери из – за увеличения нагрева обмотки статора и соответственно несколько снизится к. п. д.

24. Пересчет электродвигателя при изменении частоты.

При пересчете электродвигателя на другую частоту следует руководствоваться формулой (12), которую можно записать в следующем виде, формула (39):

$$U \approx E = k \times f_1 \times \Phi \qquad (39)$$

или

$$\Phi = \frac{E}{k \times f_1} \approx \frac{U}{k \times f_1}$$

где: k – коэффициент, включающий в себя постоянные величины и величины, зависящие от данных обмотки; f_1 – частота питающей сети; Φ – магнитный поток; U – напряжение сети.

Из приведенных формул видно, что при изменении частоты в сети и сохранении обмоточных данных у электродвигателя следует в таком же соотношении изменить напряжение сети и тем самым сохранить неизменным магнитный поток. В этом случае, т. е. при изменении напряжения пропорционально изменению частоты, электродвигатель при сохранении неизменным момента вращения будет работать с практически неизменными значениями к. п. д., cos φ и перегрузочной способности.

В таком режиме работает, например, электроверетено ЭВ–3, предназначенное для прядения и кручения вискозного волокна. При работе электроверетена со скоростью вращения 8000 *об. мин.* (синхронных) питающая сеть имеет частоту 133 *гц* и напряжение 104 *в*, а при работе электроверетена со скоростью 9000 *об. мин.* (синхронных) питающая сеть должна иметь частоту 150 *гц* и напряжение 117 *в*.

При переходе на другую частоту без изменения напряжения сети следует изменить обмоточные данные статора электродвигателя и этим оставить магнитный поток прежним, что следует из формулы (40):

$$\Phi = \frac{U}{f \times w} \quad (40)$$

Пересчет электродвигателя на другую частоту при не изменном напряжении производят по формулам:
а) число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{\text{НОВ}} = w_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

б) число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

в) сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

г) мощность при новой частоте по формуле (41):

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} \quad (41)$$

При значительном повышении частоты (200 – 500 *гц*) необходимо несколько ограничить повышение мощности (на 15–35%) вследствие снижения к. п. д. из–за увеличения потерь в меди (явление поверхностного эффекта) и потерь в активной стали. Также необходимо учитывать изменение условий охлаждения при разных скоростях вращения. Так как переход на повышенную частоту влечет за собой увеличение скорости вращения электродвигателя, то при подобных пересчетах необходимо проверять окружную скорость ротора по формуле (38).

25. Примеры расчетов.

Пример. Требуется произвести сокращенный расчет обмотки статора электродвигателя с короткозамкнутым ротором, не имеющего технического паспорта обмотки.

Данные электродвигателя:
Скорость вращения n = 1500 *об. мин.*
Напряжение U = 220/380 *в*.

Результаты замеров:

Внутренний диаметр статора $D_{\text{В}}$ = 145 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 200 *мм*.
Число пазов статора z = 36
Ширина зубца статора (расчетная) b_{Z} = 6,8 *мм*.
Высота спинки статора $h_{\text{С}}$ = 28 *мм*.

Примечания:
1. Замеры производят в миллиметрах, а запись размеров в формулы для расчета производят в сантиметрах.
2. Измерение ширины зубца и спинки статора производят с точностью до 0,1 *мм*.

Задаются максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре $B_В$ = 6900 *гс* и по табл. 4 постоянных коэффициентов для $2p = 4$ и $z = 36$ пазов определяют величину C и число эффективных проводов в пазе статора:

$$N_П = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times B_B} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{14{,}5 \times 20{,}0 \times 6900} = 15{,}9$$

Число эффективных проводов в пазе статора принимается Nп = 16, а величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не меняют в связи с небольшой разницей между взятыми эффективными проводами в пазе и полученными расчетами. Определяют магнитную индукцию в зубце статора:

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{z \times b_Z} = 3{,}5 \times \frac{6900 \times 14{,}5}{36 \times 0{,}68} = 14200 \text{ гс}$$

Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times h_С} = 0{,}6 \times \frac{6900 \times 14{,}5}{2 \times 2{,}8} = 10700 \text{ гс}$$

Сравнивая полученные магнитные индукции с допустимыми по табл. 3, видим, что число эффективных проводов в пазе можно уменьшить и этим увеличить индукцию. Окончательно число эффективных проводов в пазе принимают $N_П$ = 15 и пересчитывают магнитные индукции:

$$B_B = \frac{6900 \times 16}{15} = 7400 \text{ гс}$$

$$B_Z = \frac{14200 \times 16}{15} = 15200 \text{ гс}$$

$$B_a = \frac{10700 \times 16}{15} = 11400 \text{ гс}$$

По оттиску паза определяют сечение паза $S_П$ задаются коэффициентом заполнения паза $k_П$ и определяют сечение одного эффективного провода с изоляцией:

Сечение паза: $S_П = 125$ мм^2

Для трапециевидного паза и однослойной обмотки: $k_П = 0{,}41$

$$F_{ИЗ} = \frac{k_П \times S_П}{N_П} = \frac{0{,}41 \times 125}{15} = 3{,}42 \text{ мм}^2$$

Определяют сечение одного элементарного провода с изоляцией, приняв число параллельных ветвей $a = 1$ и число параллельных проводов $b = 2$:

$$s_{1ИЗ} = \frac{F_{ИЗ}}{a \times b} = \frac{3{,}42}{1 \times 2} = 1{,}71 \text{ мм}^2$$

Определяют диаметр одного элементарного провода с изоляцией по переводной таблице или вычислением: $d_{ИЗ} = 1{,}47$ мм.

Определяют диаметр голого провода марки ПЭЛБО:

$$d = d_{ИЗ} - \delta_{ИЗ} = 1{,}47 - 0{,}21 = 1{,}26 \text{ мм.}$$

а по ГОСТ d = 1,25 *мм.*, что соответствует сечению s_1 = 1,23 *мм*².
Задаются плотностью тока для медных проводов Δ = 6 *а*/*мм*² и вычисляют фазный ток электродвигателя:

$$I_Ф = \Delta \times b \times s_1 = 6 \times 2 \times 1{,}23 = 14{,}7\ a$$

По приложению 5 выбирают к. п. д. и cos φ, где для электродвигателя 6–8 *квт* к. п. д. = 0,87, cos φ = 0,86 и мощность равна:

$$P = \frac{3 \times U_Ф \times I_Ф \times \cos\varphi \times \eta}{1000} = \frac{3 \times 220 \times 14{,}7 \times 0{,}86 \times 0{,}87}{1000} = 7{,}3 \text{ квт.}$$

Пример. Произвести поверочный расчет обмотки статора электродвигателя со следующими техническими данными: мощность 9,6 *квт*, напряжение 220/380 *а*, ток 34,3/19,8 *а*, скорость вращения 1000 *об. мин.*, ротор – короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора $D_В$ = 230 *мм*.
Длина активной стали статора (без вент. каналов) L = 156 *мм*.
Число пазов статора z = 54
Ширина зубца статора b_Z = 5,2 *мм*.
Высота спинки статора $h_С$ = 21 *мм*.
Число элементарных проводов в пазе N = 32
Провод ПБД 1,74 *мм*. параллельно в два провода.
Шаг по пазам y = 1 – 9, обмотка двухслойная.

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{C \times 10^6}{D_В \times L \times N_П} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{23{,}0 \times 15{,}6 \times 16} = 5500 \text{ гс}$$

Так как элементарных проводов в пазе 32, а обмотка выполнена в два параллельных провода без параллельных ветвей, то число эффективных проводов в пазе $N_П$ = 16 (при наличии, например, трех параллельных ветвей и двух параллельных проводов число эффективных проводов в пазе было бы 32/3 × 2 = 5,33).

Магнитная индукция в зубце статора:

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{z \times b_Z} = 3{,}5 \times \frac{5500 \times 23}{54 \times 0{,}52} = 15800 \text{ гс}$$

Магнитная индукция в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times h_С} = 0{,}6 \times \frac{5500 \times 23}{3 \times 2{,}1} = 12100 \text{ гс}$$

Плотность тока в обмотке статора:

$$\Delta = \frac{I_{\Phi}}{a \times b \times s_1} = \frac{19{,}8}{1 \times 2 \times 2{,}378} = 4{,}2\ a/\text{мм}^2$$

где: I_{Φ} – фазный ток обмотки статора, равный при соединении звездой линейному току; a – число параллельных ветвей в обмотке статора; b – число параллельных проводов в обмотке статора; s_1 – сечение элементарного провода обмотки статора.
Так как магнитные индукции и плотность тока здесь не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5), число эффективных проводов в пазе обмотки статора и диаметр провода соответствуют данным этого электродвигателя.

Пример. Требуется перемотать электродвигатель с напряжением 127/220 на 220/380 *в*.
Данные электродвигателя: мощность 37 *квт*. напряжение 127/220 *в*; ток 230/133 *а*; скорость вращения 750 *об. мин.*, ротор – фазный; обмотки статора и ротора соединены звездой.
Данные замеров:

Внутренний диаметр статора $D_В$ = 365 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 210 *мм*.
Число пазов статора z = 72
Число элементарных проводов в пазе N = 21
Число параллельных ветвей a = 2
Провод ПБД 2,63 *мм*., сечение s_1 = 5,432 *мм*²
Число параллельных проводов b = 3
Шаг по пазам 1 – 10, обмотка однослойная.

Число эффективных проводов в пазе обмотки статора:

$$N_{\text{ПСТ}} = \frac{N}{a \times b} = \frac{21}{2 \times 3} = 3{,}5$$

Необходимое число эффективных проводов в пазе обмотки статора при напряжении 220/380 *в*:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{U_{\text{ФНОВ}}}{U_{\text{ФСТ}}} = 3{,}5 \times \frac{220}{127} = 6{,}1$$

Сечение эффективного провода обмотки статора при напряжении 127/220 *в*:

$$F_{\text{СТ}} = s_{1\text{СТ}} \times \text{a} \times b = 5{,}432 \times 2 \times 3 = 32{,}5 \quad \text{мм}^2$$

Необходимое сечение эффективного провода при напряжении 220/380 *в*:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{U_{\text{ФСТ}}}{U_{\text{ФНОВ}}} = 32{,}5 \times \frac{127}{220} = 18{,}8 \quad \text{мм}^2$$

Сечение элементарного провода при четырех параллельных ветвях и выполнении обмотки в один провод:

$$s_{1\text{НОВ}} = \frac{F_{\text{НОВ}}}{a \times b} = \frac{18{,}8}{4 \times 1} = 4{,}7 \quad \text{мм}^2$$

По сечению находят диаметр провода: 2,44 *мм*., что соответствует сечению S_1 = 4,676 *мм*².

Ток при напряжении 220/380 *в*:

$$I_{\text{ФНОВ}} = I_{\text{ФСТ}} \times \frac{U_{\text{ФСТ}}}{U_{\text{ФНОВ}}} = 133 \times \frac{127}{220} = 76{,}5\ a$$

Число элементарных проводов в пазе статора при напряжении 220/380 *в*:

$$N_{\text{НОВ}} = N_{\text{ПНОВ}} \times \text{a} \times b = 6{,}1 \times 4 \times 1 = 24{,}4$$

Принимается $N_{\text{НОВ}}$ = 25; тогда

$$N_{\text{ПНОВ}} = \frac{25}{4 \times 1} = 6{,}25$$

В целях проверки подсчитывают:
величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_B = \frac{\text{C} \times 10^6}{D_{\text{B}} \times L \times N_{\text{ПНОВ}}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{36{,}5 \times 21 \times 6{,}25} = 6650\ \text{гс}$$

плотность тока в обмотке статора, $a/мм^2$:

$$\Delta = \frac{I_{\text{ФНОВ}}}{s_{1\text{НОВ}} \times a \times b} = \frac{76{,}5}{4{,}676 \times 4 \times 1} = 4{,}1$$

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке статора не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5). Обмотку ротора при пересчете электродвигателя на новое напряжение не меняют, так как напряжение на кольцах ротора и фазный ток при этом остаются прежними.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель типа АО51–4 на 3000 *об. мин.*
Технические данные: мощность 4,5 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 16,1/9,3 *а*, скорость вращения 1500 *об. мин.*, ротор – короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора $D_{\text{В}}$ = 152 *мм*.
Диаметр ротора D_2 = 151,2 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 90 *мм*.
Число, пазов статора z = 36
Ширина зубца статора b_{Z} = 7 *мм*.
Высота спинки статора h_{C} = 24,5 *мм*.
Число элементарных проводов в пазе N = 64
Провод ПЭЛБО 1,16 *мм*.; параллельных ветвей нет; параллельных проводов – 2 (следовательно, Nп = 32). Шаг по пазам 1 – 10; обмотка однослойная.

Определяют наименьшее число полюсов, допустимое для данного электродвигателя:

$$2p = 0{,}5 \times \frac{D_B}{h_{\text{C}}} = 0{,}5 \times \frac{15{,}2}{2{,}45} = 3{,}1$$

Ближайшее четное число 4 и, если пренебречь 0,1, также 2. Следовательно, конструкция электродвигателя позволяет изменить скорость вращения с 1500 на 3000 *об. мин.*

Определяют число эффективных проводов в пазе при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{n_{\text{СТ}}}{n_{\text{НОВ}}} = 32 \times \frac{1500}{3000} = 16$$

Вычисляют величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_{\text{В}} = \frac{\text{С} \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{ПНОВ}}} = \frac{15{,}9 \times 10^6}{15{,}2 \times 9 \times 16} = 7300 \text{ гс}$$

Вычисляют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_{\text{а}} = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times h_{\text{С}}} = 0{,}6 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{1 \times 24{,}5} = 27000 \text{ гс;}$$

Так как индукция в спинке статора слишком велика, число эффективных проводов в пазе следует увеличить.
Величина магнитной индукции в спинке статора принимается Bа = 16500 *гс* и окончательно определяется число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{ПНОВ}} = 16 \times \frac{27000}{16500} = 26$$

Пересчитывают соответственно и величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_B = 7300 \times \frac{16}{26} = 4500 \text{ гс}$$

Определяют сечение элементарного провода при переходе с 32 эффективных проводов в пазе (при n = 1500 *об. мин.*) на 26, сечение элементарного провода при:

n = 1500 об/мин, s_1 = 1,057 мм^2

Сечение эффективного провода:

$$F_{\text{СТ}} = s_1 \times a \times b = 1{,}057 \times 1 \times 2 = 2{,}114 \quad \text{мм}^2$$

Новое сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{ПСТ}}}{N_{\text{ПНОВ}}} = 2{,}114 \times \frac{32}{26} = 2{,}6 \text{ мм}^2$$

Принимают число параллельных проводов b = 2; определяют сечение элементарного провода при n =3000 *об. мин.*:

$$s_{1\text{НОВ}} = \frac{F_{\text{НОВ}}}{a \times b} = \frac{2{,}6}{1 \times 2} = 1{,}3 \quad \text{мм}^2$$

Принимается провод ПЭЛБО 1,30 мм; $s_{1\text{НОВ}}$ = 1,327 *мм*^{2}. Число элементарных проводов в пазе:

$$N_{\text{НОВ}} = N_{\text{ПНОВ}} \times a \times b = 26 \times 1 \times 2 = 52$$

Определяют плотность тока в обмотке статора при n = 1500 *об. мин.*:

$$\Delta_{\text{СТ}} = \frac{I_{\text{ФСТ}}}{F_{\text{СТ}}} = \frac{9{,}3}{2{,}114} = 4{,}42 \quad a/\text{мм}^2$$

Определяют фазный ток при плотности тока $\Delta_{\text{НОВ}}$ = 5,1 *а/мм²* с учетом улучшения охлаждения при переходе с 1500 на 3000 *об. мин.*:

$$I_{\text{ФНОВ}} = \Delta_{\text{НОВ}} \times s_{1\text{НОВ}} \times a \times b = 5{,}1 \times 1{,}327 \times 1 \times 2 = 13{,}5\ a$$

Определяют новую мощность электродвигателя, приняв к. п. д. и cos φ равными старым величинам:

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{I_{\text{ФНОВ}}}{I_{\text{ФСТ}}} = 4{,}5 \times \frac{13{,}5}{9{,}3} = 6{,}5 \ \text{квт}$$

Вычисляют номинальный момент вращения на валу при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{\text{СТ}} = 975 \times \frac{P_{\text{СТ}}}{n_{\text{СТ}}} = 975 \times \frac{4{,}5}{1500} = 2{,}92\ \text{кг} \times \text{м}$$

$$M_{\text{НОВ}} = 975 \times \frac{P_{\text{НОВ}}}{n_{\text{НОВ}}} = 975 \times \frac{6{,}5}{3000} = 2{,}11\ \text{кг} \times \text{м}$$

Определяют, во сколько раз новый вращающий момент меньше старого:

$$\frac{M_{\text{СТ}}}{M_{\text{НОВ}}} = \frac{2{,}92}{2{,}11} = 1{,}38\ \text{раза}$$

Вычисляют окружную скорость ротора:

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_2 \times n_{\text{НОВ}}}{60 \times 1000} = \frac{3{,}14 \times 151{,}2 \times 3000}{60 \times 1000} = 23{,}8\ \text{м/сек}$$

что находится в пределах допустимого.
Обмотку выполняют двухслойной с шагом 1 – 13, двумя катушечными группами в фазе и при шести катушках в группе.

Пример. Пересчитать электродвигатель с фазным ротором с 1500 на 750 об. мин. Технические данные электродвигателя типа Т; мощность 29 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 97/56 *а*; скорость вращения n = 1500 *об. мин.*; напряжение на кольцах ротора $U_{\text{ЛИН}2}$ = 290 *в*; соединение обмотки ротора Y.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора $D_{\text{В}}$ = 220 *мм*.
Диаметр ротора D_2 = 218,8 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 245 *мм*.
Число пазов ротора z_2 = 48
Число пазов статора z_1 = 36. Число элементарных проводов в пазе N_1 = 34

Провод ПБД 1,81 *мм*. параллельно в два, две параллельные ветви. Обмотка статора – однослойная катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1–8; 1–10; 1–12. Обмотка ротора – катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1–10; 1–12; 1–14; 1–16.

Число элементарных проводов в пазе N_2 = 5. Провод ПБД 3,53 *мм.*; обмотка выполнена в один провод без параллельных ветвей; $S_{1,2}$ = 9,787 *мм²*; $N_{П2}$ = 5; соединение обмотки ротора Y. Число эффективных проводов в пазе статора при n = 1500 *об. мин.*:

$$N_{\text{П1СТ}} = \frac{N_1}{a \times b} = \frac{34}{2 \times 2} = 8{,}5$$

Число эффективных проводов в пазе статора при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{\text{П1НОВ}} = N_{\text{П1СТ}} \times \frac{n_{\text{СТ}}}{n_{\text{НОВ}}} = 8{,}5 \times \frac{1500}{750} = 17$$

Новое сечение провода обмотки статора:
сечение элементарного провода при n = 1500 *об. мин.*, s_1 = 2,573 *мм²*
сечение эффективного провода:

$$F_{\text{СТ}} = s_1 \times a \times b = 2{,}573 \times 2 \times 2 = 10{,}3 \text{ мм}^2$$

Новое сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{П1СТ}}}{N_{\text{П1НОВ}}} = 10{,}3 \times \frac{8{,}5}{17} = 5{,}15 \text{ мм}^2$$

Принимается число параллельных проводов $b_{\text{НОВ}}$ = 2, а число параллельных ветвей $a_{\text{НОВ}}$ = 2; тогда число элементарных проводов в пазе статора:

$$N_{\text{П}} = N_{\text{П1НОВ}} \times a \times b = 17 \times 2 \times 2 = 68$$

Сечение элементарного провода:

$$s_{1\text{НОВ}} = \frac{F_{\text{НОВ}}}{a_{\text{НОВ}} \times b_{\text{НОВ}}} = \frac{5{,}15}{2 \times 2} = 1{,}29 \text{ мм}^2$$

Принимается провод ПЭЛБО 1,25 *мм.*; $s_{1нов}$ = 1,23 *мм²*.
Пересчитывают величину сечения эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = s_{1\text{НОВ}} \times \text{a} \times b = 1{,}23 \times 2 \times 2 = 4{,}92 \text{ мм}^2$$

Мощность электродвигателя при n = 750 *об. мин.* без учета изменения к. п. д. и cos φ:

$$P'_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{n_{\text{НОВ}}}{n_{\text{СТ}}} = 29 \times \frac{750}{1500} = 14{,}5 \text{ квт}$$

Учитывая ухудшение охлаждения при переходе на меньшую скорость вращения, мощность электродвигателя следует уменьшить на 10%:

$$P''_{\text{НОВ}} = 0{,}9 \times P'_{\text{НОВ}} = 0{,}9 \times 14{,}5 = 13 \text{ квт}$$

По приложению 6 находят к. п. д. и cos φ для P = 29 *квт* и n = 1500 *об. мин.*, η = 0,87 и cos φ = 0,87, а для P = 13 *квт* и n = 750 *об. мин.* η = 0,83 и *cos* φ = 0,77.
Определяют мощность электродвигателя:

$$P_{\text{НОВ}} = 0{,}9 \times P_{\text{СТ}} \times \frac{n_{\text{НОВ}} \times \eta_{\text{НОВ}} \times \cos\varphi_{\text{НОВ}}}{n_{\text{СТ}} \times \eta_{\text{СТ}} \times \cos\varphi_{\text{СТ}}} = 0{,}9 \times 29 \times \frac{750 \times 0{,}83 \times 0{,}77}{1500 \times 0{,}87 \times 0{,}87} \approx 11\text{квт}$$

Проверяют ток в обмотке статора:

$$I_{\text{Ф1НОВ}} = \frac{P_{\text{НОВ}} \times 10^3}{3 \times U_{\text{ф}} \times \eta_{\text{НОВ}} \times \cos \varphi_{\text{НОВ}}} = \frac{11 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0{,}83 \times 0{,}77} = 25{,}9\ a$$

$$\Delta_{\text{НОВ}} = \frac{I_{\text{Ф1НОВ}}}{F_{\text{НОВ}}} = \frac{25{,}9}{4{,}29} = 5{,}3\ \text{а/мм}^2$$

Максимальная индукция в воздушном зазоре при n = 750 *об. мин.*:

$$B_B = \frac{\text{C} \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{ПНОВ}}} = \frac{63{,}6 \times 10^6}{22 \times 24{,}5 \times 17} = 7000\ \text{гс}$$

Магнитную индукцию в зубце статора не подсчитывают, так как при переходе с 1500 на 750 *об. мин.* она не изменится, ибо максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре не изменилась (уменьшили скорость вращения в 2 раза и увеличили число эффективных проводов в пазе тоже в 2 раза).
Обмотка статора двухслойная с шагом по пазам 1 – 5. В фазе четыре катушечные группы по одной катушке и четыре по две катушки в группе. Определяют число эффективных витков в фазе обмотки ротора при n = 750 *об. мин.*

Напряжение на кольцах ротора оставляют прежним, т. е.

$$U_{\text{ЛИН2}} = 290\ \text{в} \qquad w_{2\text{НОВ}} = \frac{w_{1\text{НОВ}} \times U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}}\ \text{витков}$$

Предварительно вычислим число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{\text{НОВ}} = \frac{N_{\text{П1НОВ}} \times z_1}{2 \times m_1} = \frac{N_{\text{П1НОВ}} \times z_1}{6} = \frac{17 \times 36}{6} = 102\ \text{витка}$$

Число эффективных витков в фазе обмотки ротора:

$$w_{2\text{НОВ}} = \frac{102 \times 290}{220 \times \sqrt{3}} = 78\ \ \text{витков}$$

$$U_{\Phi 2} = \frac{U_{\text{ЛИН2}}}{\sqrt{3}} \quad \text{так как обмотка соединена в Y.}$$

Число эффективных проводов в пазе ротора:

$$N_{\text{П2НОВ}} = \frac{2 \times m_2 \times w_{2\text{НОВ}}}{z_2} = \frac{6 \times w_{2\text{НОВ}}}{z_2} = \frac{6 \times 78}{48} = 9{,}75$$

Принимая $N_{\text{П2НОВ}}$ = 10, пересчитывают:
число эффективных витков в фазе обмотки ротора:

$$w_{2\text{НОВ}} = 78 \times \frac{10}{9{,}75} = 80$$

линейное напряжение на кольцах ротора:

$$U_{\text{ЛИН2}} = 290 \times \frac{80}{78} = 297\ \text{в}$$

Определяют ток ротора:

$$I_{\Phi 2\text{НОВ}} = (09 - 0{,}85) \times I_{\Phi 1\text{НОВ}} \times \frac{w_{1\text{НОВ}}}{w_{2\text{НОВ}}} = 0{,}9 \times 25{,}9 \times \frac{102}{80} = 29{,}2\ a$$

Определяют сечение эффективного провода обмотки ротора при $N_{\text{П2НОВ}} = 10$:

$$F_{2\text{НОВ}} = F_{2\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{П2СТ}}}{N_{\text{П2НОВ}}} = s_{1\text{СТ}} \times \text{a}_{\text{СТ}} \times b_{\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{П2СТ}}}{N_{\text{П2НОВ}}} = 9{,}787 \times 1 \times 1 \times \frac{5}{10} = 4{,}89\ \text{мм}^2$$

Принимается провод ПБД 1,74 *мм*. (сечение $s_{1,2} = 2{,}378$ *мм*^{2}); обмотку выполняют с двумя параллельными ветвями в один провод ($N_{2\text{НОВ}} = 2N_{\text{П2НОВ}}$).
Проверяют заполнение паза ротора вычислением коэффициента заполнения паза и сравнением его с общепринятыми величинами или практическим заполнением паза проводом диаметром 1,74 *мм*.
Определяют плотность тока в обмотке ротора:

$$\Delta_{2\text{НОВ}} = \frac{I_{\Phi 2\text{НОВ}}}{s_{1,2\text{НОВ}} \times \text{a}_{\text{НОВ}} \times b_{\text{НОВ}}} = \frac{29{,}2}{2{,}378 \times 1 \times 2} = 6{,}1\ \ \text{а/мм}^2$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку ротора выполняют катушечной с шагом по пазам 1 – 6 и 1 – 8 с четырьмя катушечными группами в фазе, а в катушечной группе по две катушки.
Вычисляют номинальный момент вращения на валу электродвигателя при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{\text{СТ}} = 975 \times \frac{P_{\text{СТ}}}{n_{\text{СТ}}} = 975 \times \frac{29}{1500} = 18{,}8\ \text{кг} \times \text{м}$$

$$M_{\text{НОВ}} = 975 \times \frac{P_{\text{НОВ}}}{n_{\text{НОВ}}} = 975 \times \frac{12}{750} = 15{,}6\ \text{кг} \times \text{м}$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшился номинальный вращающий момент при переходе на новую скорость вращения:

$$\frac{M_{\text{СТ}}}{M_{\text{НОВ}}} = \frac{18{,}8}{15{,}6} = 1{,}21\ \text{раза}$$

Пример. Требуется пересчитать на частоту 150 *гц* электродвигатель А31/4 0,6 *квт*, 220/380 *в*, 2,8/1,6 *а*, 50 *гц*, 1410 *об. мин.* Данные обмотки: $z = 24$; $2p = 4$; число эффективных проводов в пазе $N_{\text{П}} = 118$; провод ПЭЛБО 0,57 *мм*. без параллельных ветвей и параллельных проводов. Число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}} = 118 \times \frac{50}{150} \approx 40$$

Сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 0{,}255 \times \frac{150}{50} = 0{,}765\ \text{мм}^2$$

Берем провод ПЭЛБО сечением 0,724 *мм*^{2}, что соответствует 0,96 *мм*.
Мощность электродвигателя:

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 0{,}6 \times \frac{150}{50} = 1{,}8\ \ \text{квт}$$

Ток при неизменных к. п. д. и cos φ:

$$I_{\text{нов}} = I_{\text{ст}} \times \frac{f_{\text{нов}}}{f_{\text{ст}}} = 1{,}6 \times \frac{150}{50} = 4{,}8\ a$$

вычислим плотность тока (для проверки правильности расчета):

$$\Delta = \frac{I_{\text{нов}}}{F_{\text{нов}}} = \frac{4{,}8}{0{,}765} = 6{,}27\ \text{а/мм}^2$$

Новая скорость вращения, синхронная:

$$n_{\text{нов}} = n_{\text{ст}} \times \frac{f_{\text{нов}}}{f_{\text{ст}}} = 1500 \times \frac{150}{50} = 4500 \quad \text{об. мин}$$

26. Замечания к расчетам.

После произведенного частичного ремонта или полной замены обмотки статора технические данные электродвигателя должны соответствовать данным обмоточно–расчетной карточки и, кроме того, отношение пускового и максимального моментов вращения к номинальному должно соответствовать ГОСТ. Поскольку измерение моментов вращения электродвигателей сопряжено с некоторыми трудностями, чаще всего о пригодности электродвигателя судят по величине тока холостого хода, который должен составлять определенный процент номинального тока для данной группы электродвигателей.

В табл. 12 (см. гл. 11) указаны допустимые величины тока холостого хода в процентах номинального в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя. Иногда бывает, что хотя обмотка статора выполнена по правильно произведенному расчету, но при испытании ток холостого хода завышен. Такое явление может быть объяснено следующим:
Сердечник статора или ротора сдвинут с места, что уменьшает фактическую длину активной стали.
Активная сталь статора (ротора) или того и другого низкого качества. Для устранения этого дефекта обмотку статора следует перемотать с увеличением числа эффективных проводов в пазе при соответствующем снижении мощности.
Зазор между сердечником статора и сердечником ротора завышен из–за чрезмерной проточки ротора или длительного трения стали ротора о сталь статора. В таких случаях обмотку статора следует перемотать, увеличив число эффективных проводов в пазе, снизив при этом мощность. Бывают случаи, когда воздушный зазор так велик, что может возникнуть вопрос о целесообразности перемотки статора из–за резкого снижения cos φ и чрезмерного нагрева. В таких случаях, если его все же ремонтируют, при пересчете мощность электродвигателя должна быть соответственно снижена.

Таблица 12. Допустимые величины тока холостого хода электродвигателей в процентах номинального.

Мощность электродвигателя, *квт*	Скорость вращения электродвигателя *об. мин.*					
	3000	1500	1000	750	600	500
От 0,1 – до 0,5	60	75	85	90	95	–
0,51 – 1,0	50	70	75	80	85	90
1,1 – 5,0	45	65	70	75	80	85
5,1 – 10,0	40	60	65	70	75	80
10,1 – 25,0	30	55	60	65	70	75
25,1 –50,0	20	50	55	60	65	70
50,1 – 100	–	40	45	50	55	60

Глава девятая.

Соображения по расчетам обмоток и выбору фазосмещающих элементов асинхронных однофазных электродвигателей.
Пересчет обмотки статора с трехфазной системы на однофазную.

27. О методике и основных принципах расчета обмоток статора однофазных электродвигателей с фазосмещающими элементами.

При проектировании однофазных электродвигателей с фазосмещающими элементами расчет обмоток (рабочей, пусковой, конденсаторной) и фазосмещающего элемента (пусковой емкости, рабочей емкости, активного сопротивления) выполняют применительно к заданным условиям пуска и работы двигателя.

В числе требуемых условий могут быть:

а) получение максимального пускового момента;
б) получение заданной кратности пускового момента;
в) получение заданной кратности пускового тока;
г) оптимальный режим работы при номинальной нагрузке;
д) оптимальный режим работы при заданной нагрузке;
е) получение заданной кратности максимального вращающего момента.

Часто поставленные требования являются противоречивыми и при расчете однофазных электродвигателей удовлетворяются не полностью.
Сам расчет является трудоемким и сложным, что объясняется наличием двух обмоток, числа витков и параметры которых, включая параметры фазосмещающих элементов, должны быть в строго определенном соотношении и взаимно увязаны, чем и достигается осуществление заданных условий работы и пуска двигателя.
Поэтому при ремонте асинхронных однофазных электродвигателей рекомендуется выполнять обмотки по старым данным, сверив их с данными таблиц обмоточных данных для соответствующих электродвигателей.
Если изменились требуемые условия пуска или работы электродвигателя и требуется в ходе ремонта изменить обмоточные данные или данные фазосмещающего элемента, то при выборе новых обмоточных данных или фазосмещающего элемента следует иметь в виду следующие положения:
1. В двигателях с емкостью или активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки вращающий момент, скольжение, максимальный вращающий момент, к. п. д. и коэффициент мощности зависят только от данных рабочей обмотки, а пусковой момент и кратность пускового тока – от параметров обеих обмоток.

В конденсаторных двигателях как эксплуатационные, так и пусковые характеристики зависят от обеих обмоток.
2. Пусковой момент в двигателях с пусковой емкостью можно увеличить одним из следующих способов:
а) увеличивая емкость конденсатора;
б) увеличивая сопротивление ротора путем проточки короткозамыкающих колец (или – в условиях электромашиностроительных заводов – перезаливкой беличьей клетки алюминиевым сплавом с повышенным сопротивлением;
в) увеличивая число витков пусковой обмотки.

Пусковой ток в двигателях с пусковой емкостью можно уменьшить:
а) увеличивая сопротивление ротора;
б) увеличивая число витков пусковой обмотки, уменьшив при этом емкость конденсатора.
Однако следует помнить, что с увеличением сопротивления ротора у электродвигателя с пусковой емкостью перегрузочная способность последнего (т. е. отношение максимального момента вращения к номинальному) уменьшается, а скольжение, соответствующее максимальному моменту, увеличивается. В конденсаторных электродвигателях максимальный момент вращения почти не зависит от величины активного сопротивления ротора.
3. В электродвигателях с вынесенным или встроенным пусковым сопротивлением отношение числа эффективных витков пусковой обмотки к числу эффективных витков рабочей обмотки (так называемый коэффициент трансформации) принимается обычно меньшим единицы. Например, в двигателях единой серии со встроенным пусковым сопротивлением типа АОЛБ коэффициент трансформации находится в пределах 0,23 – 0,83, увеличиваясь по мере увеличения мощности электродвигателя. Однако при значительном уменьшении коэффициента трансформаций пусковой ток может выйти за пределы допустимой величины. В электродвигателях типа АОЛГ (с пусковой емкостью) коэффициент трансформации находится в пределах 0,8 – 1,45.

В литературе по расчетам микродвигателей числом эффективных витков принято называть произведение числа витков в фазе обмотки статора на обмоточный коэффициент (эффективное число витков равно $w_1 \times k_W$).

В конденсаторных электродвигателях коэффициент трансформации может значительно отклоняться от единицы в ту или другую сторону.
При коэффициенте трансформации, равном единице, сечение провода рабочей и конденсаторной обмоток одинаково, а при отклонении от единицы сечения провода рабочей и конденсаторной обмоток должны быть обратно пропорциональны числам витков их, чем достигается примерно одинаковая плотность тока в обеих обмотках.
4. У электродвигателей с фазосмещающими элементами в цепи пусковой обмотки (емкость, активное сопротивление) сечение провода пусковой обмотки выбирается обычно меньшим, чем сечение провода рабочей обмотки, так как плотность тока в пусковой обмотке можно допустить большей (в 3 – 4 раза).
У этих же электродвигателей ток холостого хода может составлять 80 – 95% номинального. Если ток холостого хода приближается к величине номинального тока или превышает ее, то следует уменьшить индукцию в воздушном зазоре $B_в$, увеличив соответственно число витков рабочей обмотки и уменьшив при необходимости сечение эффективного провода.

5. При расчетах однофазных электродвигателей большое значение имеет правильный выбор электромагнитных нагрузок: максимальной индукции в воздушном зазоре $B_в$, плотности тока Δ и линейной нагрузки A.

Линейной нагрузкой называется число ампер–проводов, приходящихся на 1 *см*. длины внутренней окружности (расточки) статора, *а/см*.:

$$A = \frac{2 \times w \times I_{\text{Н}}}{\pi \times D_B}$$

Для однофазного электродвигателя с пусковым элементом линейная нагрузка определяется как отношение ампер–проводов рабочей обмотки к длине той части окружности, на которой расположены пазы, занимаемые этой обмоткой:

$$A = \frac{2 \times w_A \times I_A}{\alpha_{ZA}} \quad (42)$$

где: α_{ZA} – длина дуги окружности, занимаемой пазами рабочей обмотки.

В современных однофазных электродвигателях линейная нагрузка обычно составляет:

при $2p = 2$ А = 105–125 (редко – до 150) *а/см*.
при $2p = 4$ А = 120–165 (редко – до 200) *а/см*.

Плотность тока рабочей обмотки берется в пределах 4 – 8 *а/мм²*. Нижний предел берется для более мощных и более тихоходных электродвигателей с худшими условиями охлаждения. Магнитная индукция может находиться в пределах 3000 – 8000 *гс*. Нижний предел относится к электродвигателям меньшей мощности и при требовании малошумности электродвигателя. Для однофазных электродвигателей единой серии индукции приняты следующие:

при $2p = 2$ B_B 4500 ÷ 5500 *гс*
при $2p = 4$ B_B 6000 ÷ 7500 *гс*

меньшие значения магнитной индукции относятся к электродвигателям меньшей мощности.
6. Правильность принятого значения магнитной индукции в воздушном зазоре проверяется вычислением магнитной индукции в зубце Bz и спинке статора Ba.

$$Bz = B_B \times \frac{t_1}{b_Z \times k_{\text{С}}} \quad (43)$$

где: t_1 – зубцовое деление статора:

$$t_1 = \frac{\pi \times D_{\text{В}}}{z} \quad (44)$$

b_Z – расчетная ширина зубца; $k_{\text{С}}$ – коэффициент заполнения пакета статора сталью. При толщине стали 0,5 *мм*. и оксидировании листов $k_{\text{С}}$ = 0,95, при лакировке листов $k_{\text{С}}$ = 0,93.

Индукция в спинке статора определяется по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times h_{\text{С}} \times L \times k_{\text{С}}} \quad (45)$$

где: $h_{\text{С}}$ – высота спинки статора; Ф – магнитный поток (см. п. 47).

В современных однофазных электродвигателях принимается:

$$Bz = 14000 \div 20000 \text{ гс}$$
$$Ba = 12000 \div 19000 \text{ гс}$$

индукция Ba принимается тем большей, чем меньше число полюсов.

В двигателях небольшой мощности индукции Bz и Ba принимаются ближе к меньшему пределу. Для малошумных однофазных электродвигателей принимается: Bz не более 13000 *гс*, а Ba не более 10000 *гс*.
7. Число витков в фазе рабочей обмотки статора однофазного электродвигателя определяется по общей для микродвигателей формуле:

$$w_1 = \frac{U_{\text{Н}} \times ke \times 10^8}{4{,}44 \times f \times \Phi \times k_w} \quad (46)$$

где: ke–коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке статора:

$$ke = \frac{E_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}} = 0{,}7 \div 0{,}9$$

Меньшая величина ke берется для электродвигателей меньшей мощности. Формулы, которыми пользуются для вычисления обмоточных коэффициентов kw, из–за их сложности не приводятся. Ниже приводятся обмоточные коэффициенты для некоторых видов однослойных и двухслойных обмоток однофазных электродвигателей с пусковыми элементами (табл. 7).

Магнитный поток определяется по формуле:

$$\Phi = \alpha \times \tau \times L \times B_B \quad \text{мкс} \quad (47)$$

где: α – коэффициент магнитного перекрытия; L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов. Принимают $\alpha \approx 0{,}66 - 0{,}73$.
Число эффективных витков в пазе у однофазных двигателей, если рабочая обмотка занимает ⅔ пазов, определяют по формуле:

$$N_{\text{П}} = \frac{3 \times w_1}{z} \quad (48)$$

Сечение эффективного провода определяют по формуле:

$$F = \frac{I_{\text{Н}}}{\Delta} \quad \text{мм}^2$$

8. С достаточной для практики точностью емкость рабочего конденсатора для однофазного электродвигателя современной конструкции можно выбрать, пользуясь формулой:

$$\text{С} \approx (2100 \div 2300) \times \frac{P_{\text{Н}}}{U^2} \quad \text{мкф}$$

где: $P_{\text{Н}}$ – номинальная мощность электродвигателя, вт; U – напряжение электродвигателя, *в*.

Вычисленная по приведенной выше формуле емкость рабочего конденсатора будет обеспечивать оптимальный режим работы электродвигателя при нагрузке, близкой к номинальной. Пусковой момент при этом будет составлять (0,2 ÷ 0,4) $M_{Н}$.
Напряжение конденсатора должно быть равно 1,3 ÷ 1,6 × U, где U – напряжение электродвигателя. При работе электродвигателя с недогрузкой напряжение конденсатора берется ближе к высшему пределу.
Если требуется обеспечить заданную кратность пускового момента в конденсаторном электродвигателе или электродвигателе с пусковой емкостью, то часто приемлемая величина емкости рабочего или пускового конденсатора подбирается опытным путем. Опытным путем можно подобрать также необходимое активное сопротивление для пуска однофазного электродвигателя с пусковой обмоткой при заданной кратности пускового момента. Во время опыта следует использовать ползунковый реостат соответствующего сопротивления.

Таблица 7.

Вид обмотки	Число полюсов $2p$	Число пазов рабочей обмотки z_A	Число пазов пусковой обмотки z_B	Число пазов статора	Шаг обмотки y	Число пазов на полюс	Обмоточный коэффициент
Однослойная рабочая	2	12	6	18	диаметральный	6	0,830
Однослойная пусковая					диаметральный	3	0,956
Однослойная рабочая	2	16	8	44	диаметральный	8	0,826
Однослойная пусковая					диаметральный	4	0,953
Однослойная рабочая	4	16	8	24	диаметральный	4	0,834
Однослойная пусковая					диаметральный	2	0,965
Однослойная рабочая	4	24	12	36	диаметральный	6	0,830
Однослойная пусковая					диаметральный	3	0,956
Двухслойная рабочая	2	12	6	18	6	6	0,719
Двухслойная пусковая					6	3	0,830
Двухслойная рабочая	2	16	8	24	8	8	0,716
Двухслойная пусковая					8	4	0,829
Двухслойная рабочая	4	16	8	24	4	4	0,726
Двухслойная пусковая					4	2	0,837
Двухслойная рабочая	4	24	12	36	6	6	0,719
Двухслойная пусковая					6	3	0,830

9. При включении трехфазных электродвигателей по схеме однофазных рабочую емкость для режима номинальной нагрузки можно подобрать, пользуясь следующими выведенными из практики соотношениями:

при включении электродвигателя по схеме *ж*, рис. 29:

$$C_{Р} \approx 2800 \times \frac{I_{Н}}{U} \quad \text{мкф}$$

при включении электродвигателя по схеме *з*, рис. 29:

$$C_Р \approx 4800 \times \frac{I_Н}{U} \text{ мкф}$$

при включении электродвигателя по схеме *е*, рис. 29:

$$C_Р \approx 2740 \times \frac{I_Н}{U} \text{ мкф}$$

где: $C_Р$ – емкость рабочего конденсатора, соответствующая оптимальным рабочим характеристикам при номинальной нагрузке; $I_Н$ и U – номинальный ток и номинальное напряжение. Номинальным током и номинальным напряжением в данном случае называют фазные значения этих величин, указанные в паспорте. Например, при 17=220/380 *в* и *I* = 3,8/2,2 *а*, если двигатель включен по схеме *ж* или *е* (рис. 29), фазные значения будут 220 *в* и 2,2 *а*.

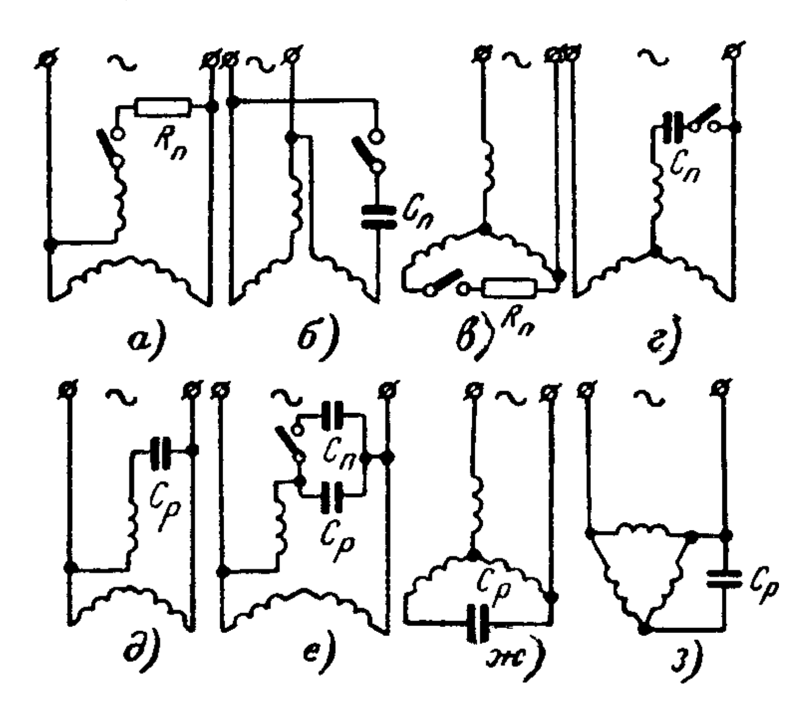


Рис. 29. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

Если подобранная рабочая емкость не обеспечивает требуемого пускового момента, то дополнительно подбирают пусковую емкость опытным путем.

10. Если однофазный электродвигатель, пересчитанный из трехфазного, не достигает нормальной скорости вращения, а застревает на низшей скорости, что может быть при однослойной обмотке статора и отсутствии скоса пазов ротора, то следует увеличить сопротивление клетки ротора проточкой короткозамыкающих колец, а также увеличить воздушный зазор (шлифовкой ротора) на 15 – 20%.

28. поверочный расчет обмотки статора однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.

Последовательность поверочного расчета рассмотрим на примере.

Требуется определить электромагнитные нагрузки и коэффициент трансформации электродвигателя АОЛБ 32/4.

Данные электродвигателя и обмотки:

Мощность на валу P = 0,4 *квт*. Напряжение U = 220 *в*
Ток I = 4,4 *а*. Скорость вращения n = 1440 *об. мин.*
Внутренний диаметр статора $D_В$ = 89 *мм*.
Длина пакета статора L = 85 *мм*.
Ширина зубца (расчетная) пакета статора b_Z = 6 *мм*.
Высота спинки пакета статора $h_С$ = 12,7 *мм*.
Число пазов статора z = 24. Число пазов, занимаемое рабочей обмоткой $z_А$ = 16
Число пазов, занимаемое пусковой обмоткой $z_В$ = 8

Рабочая обмотка: Число эффективных проводов в обмотке $N_{ПФА}$ = 864
Число эффективных проводов в пазе $N_{ПА}$ = 54
Марка и диаметр провода ПЭВ–2 0,9 *мм*.

Пусковая обмотка: Число эффективных проводов в обмотке $N_{ПВ}$ = 52
Число эффективных проводов в пазе включая бифилярную катушку $N_В$ = 108
Марка и диаметр провода ПЭЛШКО – 0,59 *мм*.

а) Вычислим линейную нагрузку:

$$A = \frac{2 \times w_A \times I_А}{\alpha_{zA}} = \frac{N_{ПФА} \times I_A}{\frac{\pi \times D_В}{z} \times z_A} = \frac{864 \times 4,4}{\frac{3,14 \times 8,9}{24} \times 16} = \frac{864 \times 4,4}{18,6} = 204 \text{ ампер} - \text{проводов}$$

б) Плотность тока рабочей обмотки:

$$\varDelta = \frac{I_Н}{F} = \frac{4,4}{0,636} = 6,9 \text{ а/мм}^2$$

в) Магнитный поток:

$$Ф = \frac{U_Н \times ke \times 10^8}{4,44 \times f \times w_A \times k_w} = \frac{220 \times 0,8 \times 10^8}{4,44 \times 50 \times \frac{864}{2} \times 0,835} = 0,219 \times 10^6 \text{ мкс}$$

г) Магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{Ф}{\alpha \times \tau \times L} = \frac{0,219 \times 10^6}{0,7 \times \frac{\pi \times D_B}{4} \times 8,5} = \frac{4 \times 0,219 \times 10^6}{0,7 \times \pi \times 8,9 \times 8,5} = 5250 \text{ гс}$$

д) Магнитная индукция в зубце:

$$Bz = B_В \times \frac{t_1}{b_Z \times k_С} = B_В \times \frac{\frac{\pi \times D_В}{z}}{b_Z \times k_С} = 5250 \times \frac{\frac{3,14 \times 8,9}{24}}{0,6 \times 0,93} = 10900 \text{ гс}$$

е) Магнитная индукция в спинке:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times h_{\text{C}} \times L \times k_{\text{C}}} = \frac{0{,}219 \times 10^6}{2 \times 1{,}27 \times 8{,}5 \times 0{,}93} = 10850 \text{ гс}$$

ж) Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{w_{\text{эВ}}}{w_{\text{Эа}}} = \frac{k_{w\text{В}} \times w_{\text{В}}}{k_{w\text{А}} \times w_{\text{А}}} = \frac{0{,}965 \times \frac{N_{\text{ПВ}}}{2}}{0{,}834 \times \frac{N_{\text{ПА}}}{2}} = \frac{0{,}965 \times \frac{416}{2}}{0{,}834 \times \frac{864}{2}} = 0{,}556$$

Следовательно, плотность тока и магнитные нагрузки находится в пределах допустимых величин; по магнитным нагрузкам двигатель немного недогружен.

29. Поверочный расчет обмотки статора однофазного электродвигателя с расщепленными полюсами.

Методика расчета однофазных электродвигателей с расщепленными полюсами является пока еще приближенной. Однако для поверочных расчетов она является вполне приемлемой. Данными для поверочного расчета являются:
а) Геометрические размеры сердечника статора и полюса:

Диаметр расточки D_B, *см*.
Длина пакета статора L, *см*.
Осевая длина полюса $L_{\text{ПЛ}} = L$, *см*.
Ширина сердечника полюса $b_{\text{ПЛ}}$, *см*.
Ширина сердечника (спинки) h_{C}, *см*.

б) Данные обмотки:
Число витков обмотки, приходящееся на полюс $w_{\text{ПЛ}}$
Число полюсов $2p$
Число параллельных ветвей a
Число параллельных проводов b
Марка и диаметр обмоточного провода

в) Технические данные электродвигателя:
Полезная мощность на валу P, *вт*
Напряжение питающей сети U, *в*
Ток I, *а*
Частота сети f, *гц*
Синхронная скорость вращения n, *об. мин.*

Число витков обмотки на одни полюс вычисляется по формуле:

$$w_{\text{ПЛ}} = \frac{E_1 \times 10^8}{2p \times 4{,}44 \times f_1 \times \Phi} \quad (49) \text{ где: } E_1 = ke \times U_1 = (0{,}8 \div 0{,}94) \times U_1$$

Φ – магнитный поток:

$$\Phi = B_B \times b_0 \times L \quad (50) \text{ где: } b_0 - \text{ расчетная полюсная дуга}$$

$b_0 = \alpha \times \tau = (0{,}6 \div 0{,}9) \times \tau$, *см*.;

$$\tau = \frac{\pi \times D_{\text{B}}}{2p} \quad \text{см.}$$

Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_B принимается в пределах 4000 – 6000 *гс*. Нижний предел относится к менее мощным электродвигателям и с меньшим числом полюсов ($2p = 2$), а верхний – к более мощным электродвигателям и с большим числом полюсов ($2p = 4$ и более).
Сечение эффективного провода:

$$F = \frac{I_1}{\Delta_1} \quad \text{мм}^2$$

где $\Delta_1 \approx 3 \div 5$ *а/мм²*.
В однофазных электродвигателях ток I_1 определяется при известной полезной мощности по формуле:

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \times \eta \times \cos\varphi} \quad a \qquad (51)$$

Индукция в сердечнике полюса определяется по формуле:

$$B_{\text{ПЛ}} = \frac{\Phi \times \sigma}{S_{\text{ПЛ}}} = \frac{\Phi \times \sigma}{L_{\text{ПЛ}} \times b_{\text{ПЛ}} \times k_{\text{C}}} \quad \text{гс} \qquad (52)$$

где: σ – коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора, $\sigma = 1{,}1 \div 1{,}16$, $k_\text{с}$ – коэффициент заполнения сердечника полюса сталью, $k_\text{с} = 0{,}93 \div 0{,}95$.

Величина индукции в сердечнике полюса $B_{\text{ПЛ}}$ принимается в пределах 8000 – 10000 *гс*.
Индукция в сердечнике (спинке) статора определяется по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi \times \sigma}{2 \times h_{\text{C}} \times L \times k_{\text{C}}} \qquad (53)$$

Величина индукции в спинке статора Ba принимается в пределах 8000 – 10000 *гс*.

Пример.
Проверить соответствие числа витков и сечения провода в электродвигателе для кокономотальных автоматов, а также пересчитать электродвигатель на напряжение 220 *в*.

Технические данные электродвигателя:
Полезная мощность $P = 5$ *вт*
Напряжение $U = 36$ *в*
Ток $I = 0{,}9$ *а*
Частота $f = 50$ *гц*
Синхронная скорость вращения $n = 1500$ *об. мин.*

Геометрические размеры статора:
Диаметр расточки $D_\text{в} = 43$ *мм*.
Длина пакета статора $L = 34$ *мм*.
Осевая длина полюса $L_{\text{ПЛ}} = L = 34$ *мм*.
Ширина сердечника полюса $b_\text{пл} = 24$ *мм*.
Ширина спинки статора $h_\text{С} = 5$ *мм*.

Данные обмотки:
Число витков обмотки, приходящееся на полюс $w'_{\text{ПЛ}} = 300$
Число полюсов $2p = 4$
Число параллельных ветвей $a = 2$
Провод ПЭВ–2 0,35 мм, сечение 0,0962 *мм²*.

Число эффективных витков обмотки, приходящееся на полюс:

$$w_{\text{ПЛ}} = \frac{w'_{\text{ПЛ}}}{a} = \frac{300}{2} = 150$$

Определяем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{E_1 \times 10^8}{2p \times 4{,}44 \times f \times w_{\text{ПЛ}}} = \frac{0{,}85 \times 36 \times 10^8}{4 \times 4{,}44 \times 50 \times 150} = 2{,}29 \times 10^4 \quad \text{мкс}$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{\Phi}{b_0 \times L} = \frac{\Phi}{\alpha \times \tau \times L} = \frac{2{,}29 \times 10^4}{0{,}75 \times \dfrac{\pi \times 4{,}3 \times 3{,}4}{4}} = 2670 \quad \text{гс}$$

Индукция в сердечнике полюса:

$$B_{\text{ПЛ}} = \frac{\Phi \times \sigma}{L_{\text{ПЛ}} \times b_{\text{ПЛ}} \times k_{\text{С}}} = \frac{2{,}29 \times 10^4 \times 1{,}12}{3{,}4 \times 2{,}4 \times 0{,}93} = 3350 \quad \text{гс}$$

Индукция в спинке статора:

$$Bc = \frac{\Phi \times \sigma}{2 \times h_{\text{С}} \times L \times k_{\text{С}}} = \frac{2{,}29 \times 10^4 \times 1{,}12}{2 \times 0{,}5 \times 3{,}4 \times 0{,}93} = 8100 \text{ гс}$$

Плотность тока:

$$\Delta = \frac{I}{s_1 \times a} = \frac{0{,}9}{0{,}0962 \times 2} = 4{,}65 \quad \text{а/мм}^2$$

Из поверочного расчета (видно, что сердечник полюса недогружен, а сердечник статора (спинка) имеет предельную магнитную нагрузку для данной мощности электродвигателя. Плотность тока приближается к верхнему пределу.
Пересчитаем обмотку на напряжение 220 *в* и выполним ее без параллельных ветвей.
Число витков на полюс при напряжении 220 *в*:

$$w_{\text{ПЛНОВ}} = w_{\text{ПЛСТ}} \times \frac{U_{\text{НОВ}}}{U_{\text{СТ}}} = 150 \times \frac{220}{36} = 917$$

Принимаем $w_{\text{ПЛНОВ}} = 920$.
Сечение эффективного провода:

$$F'_{\text{НОВ}} = F_{\text{ст}} \times \frac{U_{\text{СТ}}}{U_{\text{НОВ}}} = s_1 \times a \times \frac{U_{\text{СТ}}}{U_{\text{НОВ}}} = 0{,}0962 \times 2 \times \frac{36}{220} = 0{,}0314 \quad \text{мм}^2$$

Сечению 0,0314 *мм²* соответствует диаметр 0,20 *мм.*, однако, учитывая уменьшение коэффициента заполнения паза медью при переходе на меньшие сечения провода, берем 0,18 *мм.*; тогда сечение:

$$F_{\text{НОВ}} = 0{,}0254 \text{ мм}^2$$

Пересчитаем плотность тока:

$$\Delta_{\text{НОВ}} = \Delta_{\text{СТ}} \times \frac{F'_{\text{НОВ}}}{F_{\text{НОВ}}} = 4{,}65 \times \frac{0{,}0314}{0{,}0254} = 5{,}73 \text{ а/мм}^2$$

что можно допустить.

Ток при $U_{\text{НОВ}}$ = 220 *в*:

$$I = s_{1\text{НОВ}} \times \varDelta_{\text{НОВ}} = 0{,}0254 \times 5{,}73 = 0{,}141 \quad a$$

Произведение к. п. д. на cos φ в процентах:

$$\eta \times \cos\varphi = \frac{P}{U \times I} = \frac{5 \times 100}{220 \times 0{,}141} = 16\%$$

30. Пересчет обмотки статора электродвигателя с трехфазной системы на однофазную.

Пересчет обмотки с трехфазной системы на однофазную облегчается тем, что при неизменной скорости вращения отпадает необходимость в подсчете магнитных нагрузок – индукции в воздушном зазоре, зубце и спинке статора. Для небольших электродвигателей магнитные нагрузки оставляют прежними, а для средних увеличивают их на 10–15%, соответственно уменьшая полученное методом пересчета число эффективных витков и увеличивая сечение эффективного провода. Если заданное напряжение однофазного электродвигателя соответствует фазному напряжению трехфазного электродвигателя, то число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя принимается равным числу витков фазы трехфазного электродвигателя ($w_{\text{IA}} = w_{\text{III}}$).

Если напряжение однофазного электродвигателя отличается от фазного напряжения трехфазного электродвигателя, то пересчет числа витков производится по формуле:

$$w_{IA} = w_{III} \times \frac{U_I}{U_{III\Phi}} \quad (54)$$

где: w_{IA} – число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя;
w_{III} – число эффективных витков фазы обмотки трехфазного электродвигателя;
U_{I} – напряжение однофазного электродвигателя;
$U_{\text{IIIФ}}$ – фазное напряжение трехфазного электродвигателя.
При подсчете числа эффективных проводов в пазе необходимо брать то число пазов, которое занимает рабочая обмотка. В однофазных двигателях с пусковыми элементами рабочая обмотка занимает ⅔ пазов.
Число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки вычисляется по формуле:

$$N_{\text{ПА}} = \frac{2 \times w_1}{z_A} \quad (55)$$

где z_{A} – число пазов, занимаемое рабочей обмоткой.
Сечение эффективного провода рабочей обмотки вычисляется по формуле:

$$F_A = F_{III} \times \frac{N_{\text{П}III}}{N_{\text{ПА}}} \quad (56)$$

где: F_{A} – сечение эффективного провода рабочей обмотки;
F_{III} – сечение эффективного провода обмотки трехфазного электродвигателя;
$N_{\text{ПА}}$ – число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки;
$N_{\text{ПIII}}$ – число эффективных проводов в пазе обмотки трехфазного электродвигателя.

Число эффективных проводов в пазе пусковой обмотки принимается в 2 раза бóльшим, а сечение провода в 2 раза меньшим, чем рабочей обмотки:

$$N_{\text{ПВ}} = 2 \times N_{\text{ПА}} \quad F_{\text{В}} = 0{,}5 \times F_A$$

Ток однофазного электродвигателя определяют по вычисленному сечению для рабочей обмотки и плотности тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$I_1 = F_A \times \Delta_{III}; \quad \Delta_{III} = \frac{I_{\Phi III}}{F_{III}}$$

(При числе параллельных ветвей a = 1 и числе параллельных проводов b = 1 сечение эффективного провода F_A равно сечению элементарного провода s_1)

Мощность однофазного электродвигателя определяется по формуле:

$$P_1 = U \times I_1 \times \cos\varphi \times \eta \quad (57)$$

Подсчитанные произведения к. п. д. на cos φ можно брать из табл. 8.

Таблица 8. Произведения к. п. д. на cos φ для однофазных асинхронных двигателей с пусковыми элементами.

Мощность электродвигателя *вт*	η×cos φ при 2p = 2	η×cos φ при 2p = 4	Мощность электродвигателя *вт*	η×cos φ при 2p = 2	η×cos φ при 2p = 4
25	0,29	0,18	250	0,47	0,39
50	0,315	0,22	300	0,49	0,415
75	0,34	0,26	350	0,505	0,435
100	0,365	0,295	400	0,52	0,45
150	0,42	0,33	450	0,53	0,46
200	0,45	0,36	500	0,53	0,46

При мощности электродвигателя свыше 0,5 *квт* значения η и cos φ можно брать по приложению 6 (для трехфазного электродвигателя), снизив мощность, полученную по формуле (57), на 10–15%.

Пример. Пересчитать с трехфазной системы на однофазную обмотку статора электродвигателя типа ПА–22–2: мощность 0,125 *квт*, напряжение 220/380 *в*, ток 0,7/0,41 *а*, синхронная скорость вращения 3000 об/мин, соединение Δ/Y.

Данные обмотки трехфазного электродвигателя:

Число эффективных проводов в пазе $N_{\Pi III}$ = 270
Число пазов статора z = 18
Провод марки ПЭВ–2 0,35 *мм*., сечение $s_1 = F$ = 0,0962 *мм*²
Обмотка однослойная, шаг y = 1 – 8.

Заданное напряжение однофазного электродвигателя 220 *в*. Рабочая обмотка занимает ⅔ пазов, а пусковая ⅓ пазов (z_A = 12; z_B = 6). Обмотку выполняем двухслойной с укорочением шага на ⅓ (см. рис. 63), где:

$$y_A = y_B = 6;\ q_A = 6;\ q_B = 3.$$

Определяем число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя:

$$w_{IA} = W_{III} = \frac{N_{\Pi III Z}}{2 \times m} = \frac{270 \times 18}{2 \times 3} = 815$$

Число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки:

$$N_{ПA} = \frac{2 \times w_{IA}}{z_A} = \frac{2 \times 815}{12} = 136$$

Сечение эффективного провода рабочей обмотки:

$$F_A = F_{III} \times \frac{N_{ПIII}}{N_{ПA}} = 0{,}0962 \times \frac{270}{136} = 0{,}192 \quad мм^2$$

Берем провод ПЭВ–2 0,49 *мм.*; S_1 = 0,188 *мм***²**. Число эффективных проводов пусковой обмотки:

$$N_{ПB} = 2 \times N_{ПA} = 2 \times 136 = 272$$

Сечение эффективного провода пусковой обмотки:

$$F_B = 0{,}5 \times F_A = 0{,}5 \times 0{,}188 = 0{,}0943 \text{ мм}^2$$

Берем провод ПЭВ–2 0,35 *мм*. Определяем плотность тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$\Delta_{III} = \frac{I_{ФIII}}{F_{III}} = \frac{0{,}41}{0{,}0962} = 4{,}26 \quad а/мм^2$$

Ток однофазного электродвигателя при $\Delta_I = \Delta_{III}$:

$$I_I = F_A \times \Delta_{III} = s_{1A} \times \Delta_{III} = 0{,}192 \times 4{,}26 = 0{,}82 \quad a$$

Мощность однофазного электродвигателя:

$$P_1 = U \times I_I \times \cos\varphi \times \eta = 220 \times 0{,}82 \times 0{,}33 = 59{,}5 \approx 60 \quad вт$$

Здесь $\eta \times \cos\varphi$ взято из табл. 8 примерно для мощности $0{,}5 \times P_{III} = 0{,}5 \times 125 = 62{,}5$ *вт*. Так как расхождение между мощностью, по которой подбирали $\eta \times \cos\varphi$ по табл. 8, и мощностью, полученной расчетом для однофазного электродвигателя, незначительно, то пересчета мощности не производим.

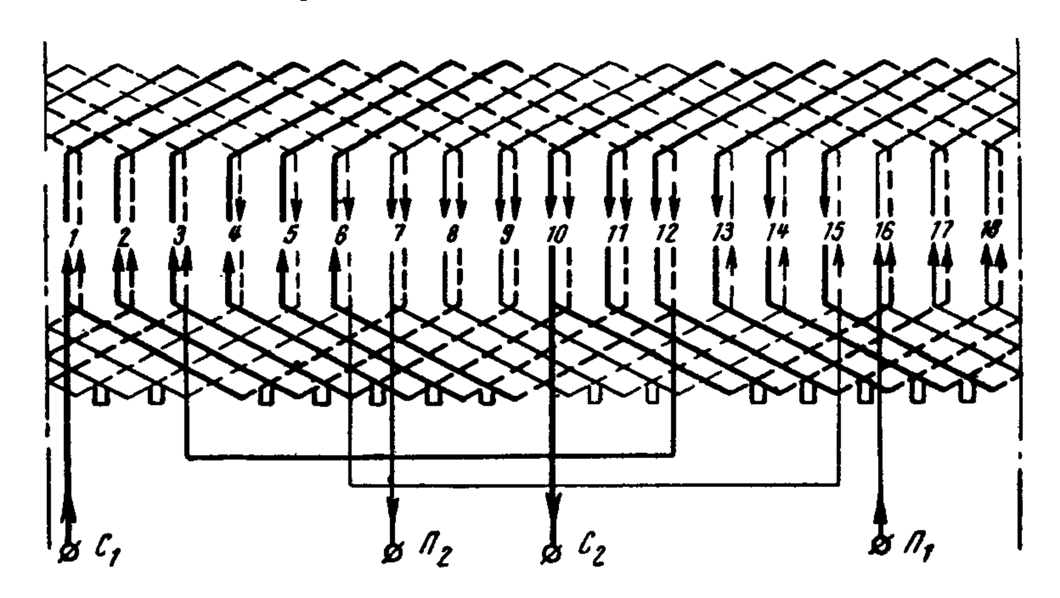


Рис. 63. Схема двухслойной обмотки однофазного электродвигателя с пусковым элементом $z = 18$, $2p = 2$, $q_A = 6$, $y_A = y_B = 6$.

Приложение 5.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186–52).

Мощность, *квт*,	к, п, д, η, %				cos φ			
	Скорость вращения (синхронная) *об/мин*,							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	–	74,0	–	–	–	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	–	0,91	0,89	0,88	–
100	91,5	92,0	–	–	0,92	0,89	–	–

Приложение 6.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнения с фазным ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186–52).

Мощность, *квт*	к. п. д. η, %			cos φ		
	Скорость вращения (синхронная), *об. мин.*					
	1500	1000	750	1500	1000	750
1,7	–	72,5	–	–	0,72	–
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87.0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

Приложение 7. Таблица замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению.

При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизонтальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диаметром, второй – по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце, Например, провод 1,25 заменяется проводами 1,16 + 0,47 или 1,12 + 0,55, или 1,08 + 0,62 и т. д.

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68	1,74	1,81	1,88	1,95
0,44	0,90	–	–	–	1,08	1,12	–	–	–	–	–	–	1,50	1,56	1,62	1,68	–	–	
0,47	–	0,93	–	–	–	–	1,16	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
0,49	–	–	0,96	–	–	–	–	1,20	–	–	–	–	–	–	–	–	1,74	–	
0,51	0,86	0,90	–	1,00	1,04	1,08	–	–	1,25	1,30	–	–	–	–	–	–	–	1,81	1,88
0,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,35	1,40	–	–	–	–	–	–	–
0,55	0,83	–	0,93	–	–	–	1,12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,57	–	–	–	0,96	–	–	–	1,16	–	–	–	–	1,45	–	–	–	–	–	–
0,59	0,80	0,86	0,90	–	1,00	1,04	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,62	–	0,83	–	0,93	–	–	1,08	–	1,20	1,25	–	–	–	1,50	1,56	–	–	–	–
0,64	0,77	–	0,86	–	0,96	–	–	1,12	–	–	1,30	1,35	–	–	–	1,62	–	–	–
0,67	–	0,80	–	0,90	–	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,68	–	–
0,69	0,72	0,77	0,83	–	0,93	–	1,04	–	1,16	–	–	–	1,40	–	–	–	–	–	–
0,72	0,69	0,74	0,80	0,86	–	0,96	–	1,08	–	1,20	–	–	–	1,45	–	–	–	1,74	1,81
0,74	–	0,72	–	0,83	0,90	–	1,00	–	1,12	–	1,25	1,30	–	–	–	–	–	–	–
0,77	0,64	0,69	–	0,80	0,86	–	–	1,04	–	1,16	–	–	1,35	–	1,50	1,56	–	–	–
0,80	0,59	0,671	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	–	1,08	–	1,20	–	–	1,49	–	–	1,62	–	–
0,83	0,55	0,62	0,69	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	–	1,12	–	1,25	–	–	–	–	–	1,68	–
0,86	0,51	0,59	0,64	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	1,04	–	1,16	–	1,30	–	1,45	1,50	–	–	1,74
0,90	0,44	0,51	0,59	0,67	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	–	1,20	–	1,35	–	–	1,56	–	–
0,93	–	0,47	0,55	0,62	0,69	–	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	–	1,25	–	1,40	–	–	–	–
0,96	–	–	0,49	0,57	0,64	0,72	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	–	1,30	–	1,45	–	1,62	–
1,00	–	–	–	0,51	0,59	0,67	0,74	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	–	1,35	–	1,50	–	1,68
1,04	–	–	–	–	0,51	0,59	0,69	0,77	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	1,30	1,40		1,56	–
1,08	–	–	–	–	0,44	0,51	0,62	0,72	0,80	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	–	1,35	1,45		1,62
1,12	–	–	–	–	–	0,44	0,55	0,64	0,74	0,83	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	–	1,40	1,50	
1,16	–	–	–	–	–	–	0,47	0,57	0,69	0,77	0,86	0,96	1,04	1,12	1,20	1,30	–	–	1,56
1,20	–	–	–	–	–	–	–	0,49	0,62	0,72	0,80	0,90	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	
1,25	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,62	0,74	0,83	0,93	1,04	1,12	1,20	1,30	1,40	1,50
1,30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,64	0,74	0,86	0,96	1,04	1,16	1,25	1,35	1,45
1,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,53	0,64	0,77	0,90	1,00	1,08	1,20	1,30	1,40
1,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,53	0,69	0,80	0,93	1,04	1,12	1,25	1,35
1,45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,57	0,72	0,86	0,96	1,08	1,20	1,30
1,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,62	077	0,86	1,00	1,12	1,25
1,56	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,62	0,77	0,90	1,04	1,16
1,62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,64	0,80	0,96	1,08
1,68	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,67	0,83	1,00
1,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,49	0,72	0,86
1,81	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,72
1,88	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51

	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
0,51	1,95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,57	–	2,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,59	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,64	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,69	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,72	1,88	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,77	–	1,95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,83	–	–	2,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,86	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,90	1,81	–	–	2,26	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,93	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,96	–	–	–	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,00	1,74		2,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,04	–	–	–	–	–	2,63	–	–	–	–	–	–	–	–
1,08	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,12	1,68	–	1,95	–	–	–	2,83	–	–	–	–	–	–	–
1,16		1,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,20	1,62	–	–	–	–	–	–	3,05	–	–	–	–	–	–
1,25	1,56	1,68	1,88	2,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,30	–	–	–	–	–	–	–	–	3,28	–	–	–	–	–
1,35	1,50	1,62	1,81	2,02	2,26	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,40	1,45	1,56	–	–	–	–	–	–	–	3,53	–	–	–	–
1,45	1,40	1,50	1,74	1,95	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–	–
1,50	1,35	1,45	1,68	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,56	1,25	1,40	1,62	1,88	2,10	–	2,63	–	–	–	3,80	–	–	–
1,62	1,20	1,35	1,56	1,81	–	–	–	2,83	–	–	–	–	–	–
1,68	1,12	1,25	1,50	1,74	2,02	2,26	–	–	–	–	–	–	4,50	–
1,74	1,00	1,16	1,45	1,68	1,95	–	–	–	3,05	–	–	–	–	–
1,81	0,90	1,08	1,35	1,62	1,88	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–
1,88	0,72	0,93	1,25	1,56	1,81	2,10	–	–	–	3,28	–	4,10	–	–
1,95	0,51	0,77	1,12	1,45	1,74	2,02	–	2,63	–	–	–	–	–	4,80
2,02	–	0,57	1,00	1,35	1,68	1,95	2,26	–	–	–	–	–	–	–
2,10	–	–	0,83	1,25	1,56	1,88	–	–	2,83	–	3,53	–	–	–
2,26	–	–	–	0,90	1,35	1,68	2,02	–	–	3,05	–	–	–	–
2,44	–	–	–	–	0,96	1,45	1,81	–	–	–	3,28	3,80	4,10	–
2,63	–	–	–	–	–	1,04	1,56	1,95	–	–	–	–	–	4,50
2,83	–	–	–	–	–	–	1,12	1,62	2,10	–	–	–	–	–
3,05	–	–	–	–	–	–	–	1,20	1,74	2,26	–	3,28	–	–
3,28	–	–	–	–	–	–	–	–	1,30	1,88	2,44	3,05	3,53	–
3,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,40	2,10	–	3,28	3,80
3,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,56	2,44	–	3,53
4,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,88	2,44	–
4,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,68	2,63
4,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,95